

دانش آزمایشگاهی ایران

سال دوازدهم ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۸

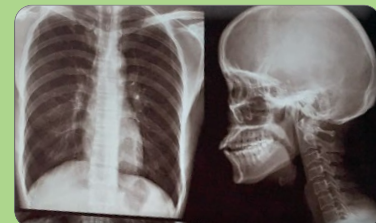
ISSN 2538-3450

بررسی تاثیر برخی
از عوامل موثر در
نتایج DLS و
راهکارهای کاهش خطا

ارتقا و توسعه شبکه آزمایشگاهی در سومین دهه فعالیت



بررسی اثر شرایط کاشت آرماتور با
چسب‌های شیمیایی در بتن بر میزان
مقاومت بیرون‌کشی



تفسیر فیلم رادیوگرافی با استفاده از هوش
مصنوعی و روش‌های پردازش تصویر



کاربرد فیلتراسیون در آماده‌سازی نمونه‌ها در
کروماتوگرافی (بخش اول)



مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک
در تعیین فلزات سنگین سرب و کادمیوم به
روش جذب اتمی کوره گرافیت در برنج



واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، گامی نو در
تشخیص مولکولی

سازنومسک





فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران

سال دوازدهم ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۸

ISSN 2538-3450

صاحب امتیاز: ستاد ویژه توسعه فناوری نانو معاونت علمی
و فناوری ریاست جمهوری

سر دبیر: علیرضا بدیعی

مدیرمسئول: مجتبی نسب

مدیریت اجرایی: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

دبیر مقالات: داود قرایلو

همکاران این شماره: کیوان ابن‌علی حیدری، بهنام ابره
سجاد رضانی جلفایی، حسین محمدی، مازیار نادر اصلی
فریده باتقوا، حمید حیدری، مهدیه شکوهی، شیلا صفائیان
بهناز محمودی، شکوفه حبیبی‌منش، محمد شفیعی، داود قرایلو

طراحی و صفحه آرایی: سیمین رفیع‌پور لنگرودی

ویراستار: زینب زرینچه

نشانی: تهران . صندوق پستی ۳۴۴-۱۴۵۶۵

تلفن: ۰۲۱ ۶۶۹۴۱۰۸۵

پایگاه اینترنتی: www.IJLK.ir

پست الکترونیکی: info@ijlk.ir



شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

فهرست مطالب

ارتقا و توسعه شبکه آزمایشگاهی در سومین دهه فعالیت

۲ <

استاندارد ASTM D7419-24

۴ <



بررسی اثر شرایط کاشت آرماتور با چسب‌های
شیمیایی در بتن بر میزان مقاومت بیرون‌کشی

۵ <



تفسیر فیلم رادیوگرافی با استفاده از هوش
مصنوعی و روش‌های پردازش تصویر

۱۱ <



کاربرد فیلتراسیون در آماده‌سازی نمونه‌ها
در کروماتوگرافی (بخش اول)

۱۸ <



مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک در
تعیین فلزات سنگین سرب و کادمیوم به روش جذب
اتمی کوره گرافیت در برنج

۲۲ <



واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای، گامی نو در
تشخیص مولکولی

۳۰ <



بررسی تاثیر برخی از عوامل موثر در نتایج
DLS و راهکارهای کاهش خطا

۳۶ <

اخبار

استاندارد

مقالات



ارتقا و توسعه شبکه آزمایشگاهی در سومین دهه فعالیت

ارتقای شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی به شبکه آزمایشگاهی کشور



دکتر حسین افشین، معاون علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان رییس‌جمهور، طی حکمی، دکتر امیر یونسین را به عنوان مدیر جدید شبکه آزمایشگاهی منصوب کرد. هم‌زمان با این انتصاب، شبکه آزمایشگاهی، در دهه سوم فعالیت، با عنوان «شبکه آزمایشگاهی کشور» به مسیر خود ادامه می‌دهد و دامنه خدمات و برنامه‌های خود را گسترش خواهد داد.

مدیر جدید شبکه آزمایشگاهی، بهره‌وری بهینه و استفاده حداکثری از سرمایه‌ها و زیرساخت‌های بخش آزمایشگاهی کشور را یکی از اصلی‌ترین راهبردهای این شبکه دانست و گفت: شبکه آزمایشگاهی کشور، طی فعالیت بیست ساله خود تلاش کرده است که دسترسی دانشگاهیان، پژوهشگران، فناوران و صنایع به خدمات آزمایشگاهی را در سراسر کشور تسهیل کند و این روند با قوت و جدیت ادامه خواهد داشت.

دکتر یونسین در خصوص رویکرد و برنامه‌های جدید شبکه آزمایشگاهی کشور عنوان کرد: سیاست‌ها و راهبردهای این شبکه در ادامه مسیر قبلی است و استفاده حداکثری از ظرفیت آزمایشگاه‌های مرتبط با حوزه

کشاورزی و غذا در شبکه آزمایشگاهی، در دستور کار قرار گرفته است. نزدیک به ۱۰۰ آزمایشگاه مرتبط با حوزه کشاورزی و غذا در سراسر کشور عضو این شبکه هستند که ۵۰ درصد از این مراکز آزمایشگاهی دولتی و نیمی دیگر از بخش خصوصی هستند.

برنامه‌های جدید توسعه شبکه آزمایشگاهی کشور

کند. به طور مثال، کشاورزان ما برای ارتقای بهره‌وری، پیش از اینکه نهاده کشاورزی را وارد زمین کنند، اگر آزمایش‌های آب و خاک را به صورت استاندارد انجام دهند با کمک متخصصین می‌توانند استفاده از نهاده‌ها را بهینه کرده و کیفیت فرآورده‌های کشاورزی را بهبود بخشند. مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور با اشاره به نقش

وی، «امنیت غذایی» و «ارتقای بهره‌وری» در کشاورزی و صنایع غذایی را به عنوان دو اولویت جدید در شبکه آزمایشگاهی کشور برشمرد و عنوان کرد: موضوعات امنیت غذایی و افزایش بهره‌وری، مهم هستند و انجام آزمایش‌های دقیق و کاربردی، پژوهش‌های کارآمد و ورود فناوری‌های نوین به حوزه کشاورزی می‌تواند این دو مهم را محقق

می‌دهند و محققان و پژوهشگران با استفاده از ظرفیت‌های مختلف شبکه آزمایشگاهی از جمله یارانه دریافت خدمات آزمایشگاهی، فعالیت تحقیقاتی و فناوریانه خود را پیش می‌برند.

دکتر یونسین، یکی دیگر از برنامه‌های جدید شبکه آزمایشگاهی کشور را استفاده از ظرفیت آزمایشگاه‌ها در بخش صنعت عنوان کرد و افزود: یکی از اولویت‌های دیگر شبکه آزمایشگاهی کشور، گردآوری، ساماندهی و تسهیل در دسترسی شرکت‌های دانش‌بنیان، صنایع، فناوران و پژوهشگران این حوزه به خدمات حوزه ساخت و تولید است.

وی با بیان اینکه خدمات طراحی صنعتی، ساخت نمونه اولیه و ساخت سریع با استفاده از ظرفیت آزمایشگاه‌های عضو این شبکه ارائه می‌شود، ادامه داد: شبکه آزمایشگاهی کشور از دریافت خدمات صنعتی پیشرفته برای شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع به صورت ویژه حمایت می‌کند؛ خدمتی که بر بستر شبکه آزمایشگاهی کشور ارائه می‌شود، پیوند میان صنایع، شرکت‌های دانش‌بنیان و فناوری با زیرساخت‌های شبکه آزمایشگاهی است.

آزمایشگاه‌های تخصصی در ارتقای بهره‌وری و تحول در کیفیت محصولات کشاورزی افزود: شبکه آزمایشگاهی می‌تواند از طریق آزمایشگاه‌های توانمند و ممتاز عضو، با کمک به پژوهش‌های تخصصی و خدماتی که به کشاورزان ارائه می‌دهد، افزایش بهره‌وری را محقق کند. در خصوص ارتقای کیفیت و بهره‌وری فرآورده‌های غذایی نیز آزمایشگاه‌ها با ارائه خدمات تخصصی مانند ارزیابی و آنالیز باقی‌مانده سموم، مواد مغذی و اصلاحات خاک، کود و سم، به افزایش کیفیت محصولات کشاورزی و سلامت آنها کمک می‌کنند.

امیر یونسین با اشاره به پیشینه شبکه آزمایشگاهی کشور در حمایت از پژوهش‌های کاربردی و توسعه فناوری‌های راهبردی عنوان کرد: شبکه آزمایشگاهی کشور، دو دهه پیش کار خود را با شبکه‌سازی آزمایشگاه‌های نانوفناوری آغاز کرد و پس از یک دهه، دامنه فناوری‌های راهبردی را در بر گرفت. در حال حاضر نزدیک به ۱۹۰۰ آزمایشگاه از بخش دولتی از جمله وزارتخانه‌ها و سازمان‌های مختلف، دانشگاه‌ها و همچنین بخش خصوصی، خدمات خود را بر بستر این شبکه به مخاطبین سراسر کشور ارائه

رویکرد بین‌المللی در ارائه خدمات آزمایشگاهی

آزمایشگاهی کشور به نشانی www.Labsnet.ir می‌توانند به خدمات آزمایشگاهی مورد نیاز خود دسترسی پیدا کنند، به آزمایشگاه‌ها درخواست بدهند و از این خدمات با استفاده از اعتبارات ارائه شده در باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی که از طریق نشانی my.labsnet.ir در دسترس است، بهره ببرند.

امیر یونسین به حمایت‌ها و خدماتی که از سوی شبکه آزمایشگاهی به مراکز آزمایشگاهی عضو ارائه می‌شود اشاره کرد و افزود: شبکه آزمایشگاهی کشور حمایت‌های متنوعی را در جهت ارتقای توانمندی‌ها، استانداردسازی و تامین نیازها در جهت ارائه خدمات بهتر به آزمایشگاه‌های عضو ارائه می‌کند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ارتقای مهارت‌ها و تخصص کارکنان آزمایشگاه‌ها در قالب برنامه‌های کارگروه‌های تخصصی، توانمندسازی آزمایشگاه‌ها در خرید، تعمیر و احیای تجهیزات، تأمین مواد مرجع و استانداردسازی و اخذ گواهینامه‌های معتبر آزمایشگاهی اشاره کرد.

دکتر یونسین با اشاره به ارائه خدمات شبکه آزمایشگاهی کشور در ابعاد ملی و بین‌المللی عنوان کرد: شبکه آزمایشگاهی کشور دارای ابعاد و ظرفیت ارائه خدمات در ابعاد بین‌المللی است و رویکرد این شبکه افزایش تعاملات بین‌المللی با آزمایشگاه‌های مختلف دنیا، متخصصان و صنایع بین‌المللی و کمک به تدوین استانداردهای بین‌المللی است. یکی از موضوعات مطرح در همکاری‌ها و فعالیت‌های بین‌المللی، استانداردها، گواهی‌های انطباق بین‌المللی است که در راستای توسعه صادرات محصولات دانش‌بنیان، ارائه خدمات آزمایشگاهی به خارج از کشور و تعامل بین پژوهشگران و محققان در ابعاد بین‌المللی اثرگذار خواهد بود.

مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور با اشاره به تسهیل دسترسی مخاطبان به انواع خدمات آزمایشگاهی بر بستر اینترنت، عنوان کرد: پایگاه اینترنتی شبکه آزمایشگاهی کشور بستری برای ارائه تازه‌ترین و روزآمدترین خدمات آزمایشگاهی از مراکز عضو و تسهیل‌کننده دسترسی مخاطبان از سراسر کشور است. این پایگاه، اطلاعات این آزمایشگاه‌ها را جمع‌آوری، بهینه‌سازی و سامان‌دهی کرده و پژوهشگران به راحتی با مراجعه به پایگاه اینترنتی شبکه



استاندارد

ASTM D7419-24

روش آزمون استاندارد برای تعیین آروماتیک کل و اشباع کننده کل در پایه‌های روغنی با استفاده از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) با تشخیص ضریب شکست

شد، قابل استفاده است. این روش استاندارد انجام آزمون برای همه دستگاه‌های HPLC که بتوانند فاز مایع را با نرخ ۳ تا ۵ میلی‌لیتر بر دقیقه و دقت بهتر از ۵/۰ درصد، پمپ کنند، استفاده می‌شود. براساس این روش، توده مشخصی از نمونه در فاز متحرک رقیق شده و حجم ثابتی از این محلول به یک کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا کالیبره شده تزریق می‌شود. مجموعه ستون جداسازی تمایل کمی به اشباع دارد در حالی که هیدروکربن‌های آروماتیک و قطبی‌ها را کند می‌کند. در نتیجه این تأخیر، هیدروکربن‌های معطر و قطبی‌ها از اشباع کننده‌ها جدا می‌شوند. در یک زمان از پیش تعیین شده، پس از شستشوی مواد اشباع، ستون به صورت معکوس می‌شود تا آروماتیک‌ها و قطبی‌ها به صورت یک نوار تیز منفرد شسته شوند.

مجموعه ستون به یک آشکارساز ضریب شکست متصل است که اجزا را در حین خروج از ستون تشخیص می‌دهد. سیگنال الکترونیکی از آشکارساز به‌طور مداوم با یک پردازشگر داده نظارت می‌شود. سیگنال‌های یکپارچه (مناطق پیک) از اجزای اشباع و آروماتیک با استفاده از یک ضریب پاسخ از پیش تعیین شده تصحیح می‌شوند و درصد جرمی اشباع کننده‌ها و آروماتیک‌ها به اضافه قطبی‌ها محاسبه می‌شوند.

ترکیب یک روغن روان کننده تأثیر زیادی بر ویژگی‌ها و کاربردهای روغن دارد. تعیین اشباع کننده‌ها، آروماتیک‌ها و قطبی کننده‌ها، تجزیه و تحلیل کلیدی این ترکیب است. توصیف ترکیب روغن‌های روان کننده در تعیین دوره‌های تعویض آنها برای مواردی همچون مخلوط کردن و غیره مهم است.

این روش آزمون تعیین آروماتیک کل و اشباع کننده کل در پایه‌های روان کننده بدون افزودنی با استفاده از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^۱ با تشخیص ضریب شکست^۲ را پوشش می‌دهد. این روش آزمایش برای نمونه‌های حاوی اشباع کننده‌های کل در محدوده غلظت ۷۴/۹ درصد تا ۱۰۰/۰ درصد جرمی و آروماتیک در محدوده غلظت ۰/۰ درصد تا ۲۵/۱ درصد جرمی قابل استفاده است. دقت بر حسب کل اشباعات بیان می‌شود. ترکیبات قطبی، در صورت وجود، با آروماتیک کل ترکیب می‌شوند. دقت برای پایه‌هایی با محتوای قطبی کمتر از ۱۰ درصد جرمی است.

این روش آزمون شامل یک بخش بایاس نسبی برای کل اشباع کننده‌ها در پایه‌ها براساس ارزیابی دقت طبق روش D6708 بین روش آزمون شماره D7419 و روش آزمون شماره D2007 است. معادله همبستگی مشتق شده فقط برای ذخایر پایه در اشباع کل در محدوده غلظت از ۷۵/۰ درصد تا ۱۰۰/۰ درصد جرمی که با روش آزمون شماره D7419 اندازه‌گیری

1. High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)
2. Refractive Index (RI)

نویسندگان

کیوان ابن‌علی حیدری^{۱*}، بهنام ابره^۲۱. کارشناس بخش ژئوتکنیک، شرکت مهندسی مشاور
آزمونه فولاد۲. مدیر ژئوتکنیک مهندسی و آزمایشات برجا، مهندسی
مشاور آزمونه فولاد

*k1.ebh95@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

بررسی اثر شرایط کاشت آرماتور با چسب‌های شیمیایی در بتن بر میزان مقاومت بیرون‌کششی

واژه‌های کلیدی

کاشت آرماتور، چسب اپوکسی،
مقاومت کششی، شرایط کاشت.

چکیده

کاشت آرماتور در بتن با استفاده از چسب‌های شیمیایی، یکی از روش‌های مؤثر در بهبود و تقویت سازه‌های بتنی به ویژه در پروژه‌های مقاوم‌سازی و تقویت زیرساخت‌ها است. این پژوهش به بررسی تأثیر نوع چسب و شرایط محیطی بر مقاومت کششی آرماتورهای کاشته شده در بتن می‌پردازد. دو نوع چسب اپوکسی و اپوکسی-اکریلات به‌عنوان مواد اتصال‌دهنده انتخاب شدند و آزمایش‌ها در شرایط مختلف شامل کاشت عمودی و افقی آرماتور به صورت صحرایی (برجا) انجام شد.

هدف این پژوهش، دستیابی به درک عمیق‌تر از چگونگی تأثیرگذاری این متغیرها بر مقاومت کششی نهایی آرماتورهای کاشته شده و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی برای افزایش کارایی آن‌ها بود. نتایج نشان داد که چسب اپوکسی به دلیل مقاومت بالاتر در برابر رطوبت و نیروهای کششی، به‌طور میانگین حدود ۲۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به چسب اپوکسی-اکریلات از خود نشان می‌دهد. این چسب در محیط‌های مرطوب و در اثر بارهای دینامیکی و استاتیکی، قدرت چسبندگی و پایداری بیشتری داشت؛ از سوی دیگر، چسب اپوکسی-اکریلات به دلیل زمان عمل‌آوری سریع‌تر و هزینه پایین‌تر، برای پروژه‌هایی با نیاز به مقاومت متوسط و محیط‌های خشک گزینه مناسبی است. همچنین این چسب به‌منظور کاشت آرماتور نیز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی داشت، به‌طوری که آرماتورهای عمودی مقاومت بیشتری نسبت به آرماتورهای افقی داشتند. این پژوهش همچنین به مقایسه نتایج با استانداردهای بین‌المللی ASTM E488 و ACI 355 پرداخت و نشان داد که نتایج آزمایش‌ها با این استانداردها سازگار است.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر تأکید می‌کند که انتخاب نوع چسب و رعایت شرایط محیطی مناسب، به ویژه تمیزی سوراخ‌ها و کنترل رطوبت، از عوامل حیاتی در بهبود عملکرد نهایی آرماتورهای کاشته شده در بتن هستند. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای مهندسان و متخصصان سازه در انتخاب چسب مناسب و تدوین دستورالعمل‌های بهینه‌سازی نصب در پروژه‌های ساختمانی و مقاوم‌سازی مورد استفاده قرار گیرند.

در صنعت ساخت و ساز، استفاده از بتن به‌عنوان یکی از مصالح اصلی در ساخت سازه‌ها امری مرسوم است. بتن به دلیل مقاومت فشاری بالای خود از دیرباز به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای سازه‌هایی که نیاز به مقاومت فشاری دارند شناخته شده‌است؛ اما بتن به تنهایی دارای مقاومت کششی قابل توجهی نیست و برای مقابله با نیروهای کششی نیاز به تقویت دارد. این موضوع منجر به توسعه روشی به نام «کاشت آرماتور» در بتن شده‌است که به‌خصوص در پروژه‌های تقویتی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و سازه‌های بتنی کاربرد فراوانی دارد. کاشت آرماتور در بتن نه تنها باعث افزایش مقاومت کششی سازه می‌شود، بلکه دوام و پایداری آن را نیز در شرایط مختلف بارگذاری بهبود می‌بخشد. با افزایش نیاز به سازه‌های مقاوم و قابل اتکا در برابر نیروهای مختلف، از جمله زلزله و سایر بارهای دینامیکی، روش‌های نوین کاشت آرماتور مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌است. این روش‌ها به‌ویژه در بهبود ساختمان‌های قدیمی و سازه‌های زیرساختی که ممکن است نیاز به تقویت داشته باشند، کاربرد دارند. یکی از این روش‌های پرکاربرد، استفاده از چسب‌های شیمیایی برای کاشت آرماتور در بتن است.

در روش کاشت آرماتور به کمک چسب‌های شیمیایی، ابتدا سوراخ‌هایی در بتن ایجاد شده و سپس آرماتورهای فولادی با استفاده از چسب‌های شیمیایی خاص در این سوراخ‌ها قرار داده می‌شوند. این چسب‌ها، به‌صورت عمومی از نوع چسب‌های اپوکسی، رزینی و یا اکریلیک هستند که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند. انتخاب نوع چسب مورد استفاده در این روش بستگی به شرایط محیطی، نوع بارگذاری و نیازهای خاص پروژه دارد. چسب‌های اپوکسی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین چسب‌های مورد استفاده در کاشت آرماتور به دلیل قدرت چسبندگی بالا و مقاومت در برابر شرایط محیطی مختلف، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب و خورنده، شناخته شده‌اند. چسب‌های شیمیایی مزایایی نسبت به روش‌های مکانیکی دارند. از جمله اینکه، به دلیل امکان کاشت در مکان‌های محدود و امکان تنظیم دقیق محل کاشت، انعطاف‌پذیری بالایی را برای مهندسان فراهم می‌کنند. علاوه بر این، این چسب‌ها به دلیل سرعت بالای عمل‌آوری و دسترسی راحت به آن‌ها در محل پروژه، از محبوبیت بالایی برخوردار هستند. از سوی دیگر، چسب‌های شیمیایی به دلیل مقاومت کمتر در برابر حرارت بالا و برخی مواد شیمیایی ممکن است دارای محدودیت‌هایی باشند.

پژوهش‌های پیشین در زمینه کاشت آرماتورهای چسبی در بتن به بررسی عوامل متعددی پرداخته‌است که بر مقاومت و عملکرد نهایی این آرماتورها تأثیرگذار هستند. مطالعات پیشین به‌طور گسترده‌ای به متغیرهای کلیدی مانند نوع چسب، شرایط محیطی، روش‌های حفاری و عملکرد طولانی مدت آرماتورها پرداخته‌اند. سوبرامانیان و کوک در سال ۲۰۰۲ میلادی دریافتند که شرایط محیطی نظیر دما، رطوبت و تمیزی سطحی سوراخ‌ها می‌تواند بر عملکرد چسب‌های اپوکسی در محیط‌های مرطوب تأثیرگذار باشد، به طوری که این نوع چسب به دلیل ویژگی‌های ضدآب بودن و مقاومت بالا، نتایج بهتری نسبت به دیگر انواع چسب‌ها ارائه می‌دهد [۱]. همچنین، الیگهواسن و کوک در سال ۲۰۰۶ میلادی در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که انتخاب چسب و رعایت شرایط نصب، تأثیر مستقیمی بر استحکام نهایی و عملکرد آرماتورهای چسبی دارد و طراحی بهینه آرماتورها می‌تواند کارایی آن‌ها را افزایش دهد [۲]. توماسکیویچ و بارلیکا در سال ۲۰۲۰ میلادی با بررسی تأثیر شکل سطحی آرماتور به این نتیجه رسیدند که آرماتورهای با سطح صاف و تمیز به دلیل توزیع یکنواخت نیرو، پیوند بهتری با چسب دارند، در حالی که ناصافی‌های سطح می‌تواند توزیع نیرو را نامتعادل کرده و پیوند را تضعیف کند [۳].

از سوی دیگر، نیل‌فروش و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی عملکرد طولانی مدت آرماتورهای چسبی پرداخته و تأکید کردند که شرایط محیطی نظیر رطوبت و تغییرات دمایی به مرور زمان باعث کاهش قدرت چسبندگی و پیوند بین آرماتور و بتن در طول دوره سرویس می‌شود [۴]. اوپادیا یا و کومار (۲۰۱۵) در پژوهش خود مدلی ریاضی برای پیش‌بینی ظرفیت بیرون‌کشی آرماتورهای چسبی ارائه و نشان دادند که انتخاب چسب مناسب و رعایت شرایط نصب به کاهش خطر بیرون‌کشی آرماتور کمک می‌کند [۵]. چن و همکاران (۲۰۲۲) نیز در بررسی عملکرد تاندون‌های کابلی به این نتیجه رسیدند که ترک‌های موجود در ساختار بتنی و شرایط خاص ساختمانی می‌تواند ظرفیت باربری نهایی کابل را به شدت کاهش دهد. به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعات تأکید می‌کنند که عوامل مهمی مانند شرایط محیطی، نوع چسب و رعایت دستورالعمل‌های نصب، به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر بر مقاومت و پایداری آرماتورهای چسبی در بتن شناخته می‌شوند [۶]. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از چسب‌های اپوکسی در محیط‌های مرطوب و بارهای سنگین مناسب است، در حالی که چسب‌های اپوکسی-اکریلات برای شرایط خشک مناسب‌ترند.

و شیمیایی برجسته، نسبت به سایر انواع چسبها برای پروژه‌های حساس و بزرگ مناسبتر هستند.

◆ **روش آماده‌سازی و نصب:** تمیزی و آماده‌سازی سطح بتن و سوراخهایی که در آن آرماتور کاشته می‌شود، یکی از مهم‌ترین مراحل در کاشت آرماتور است. هرگونه آلودگی یا گردوغبار می‌تواند به شدت پیوند چسب به بتن را تضعیف کند. بنابراین، رعایت دستورالعمل‌های مربوط به تمیزی سطح و تزریق صحیح چسب نقش اساسی در دستیابی به یک اتصال قوی ایفا می‌کند.

■ روش پژوهش

■ طراحی آزمایش

برای بررسی تأثیر نوع چسب و روش‌های مختلف کاشت بر مقاومت کششی آرماتورهای کاشته شده در بتن، این پژوهش از یک طراحی آزمایشی غیر سیستماتیک بهره گرفته است. بدین صورت که داده‌های مورد بررسی ناشی از آزمایش‌های ارجاع شده به مهندسی مشاور آرمونه فولاد در طول ۵ سال گذشته جمع‌آوری شد. سپس از نظر نوع چسب مورد استفاده و نوع کاشت (عمودی یا افقی)، داده‌ها دسته‌بندی شدند. بدیهی است که پژوهشگران این تحقیق کنترلی از نظر شرایط کاشت نظیر تمیز کردن چال حفر شده برای کاشت نداشته و صرفاً براساس اطلاعات موجود و تهیه بانک اطلاعاتی بیش از ۱۰۰ آزمایش کشش میلگرد در پروژه‌های مختلف تحلیل و بررسی صورت گرفته است. در این راستا، دو نوع چسب شیمیایی (اپوکسی و اپوکسی-اکریلات) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، آزمایش‌ها شامل کاشت آرماتور در شرایط افقی و عمودی انجام شد تا تأثیر آن به‌منظور کاشت بر مقاومت کششی نهایی بررسی شود. برای به‌دست آوردن داده‌های دقیق و مقایسه‌پذیر، آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی با ابعاد مختلف و در شرایط محیطی مختلف انجام شده است. لذا نتایج براساس طول کاشت و قطر آرماتور نرمالایز شده تا با یکدیگر مقایسه‌پذیر باشند.

■ آماده‌سازی سوراخ‌ها برای کاشت آرماتور

چال‌های حفر شده در بتن به‌طور عمومی به دو روش ایجاد می‌شوند:

◆ **استفاده از دریل چکشی:** این روش برای ایجاد سوراخ‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و به عمق ۱۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. از این روش به دلیل سرعت بالای حفر و مناسب بودن برای بتن‌های معمولی استفاده شد.

◆ **استفاده از دریل مغزه‌گیری:** برای بتن خودتراکم از این روش استفاده می‌شود تا سوراخ‌هایی صاف‌تر و بدون ترک‌خوردگی ایجاد شود.

بعد از ایجاد سوراخ‌ها، تمیزی آن‌ها باید با استفاده از یک برس فلزی و هوای فشرده انجام شد تا هرگونه گرد و غبار و آلودگی از سطح داخلی سوراخ‌ها پاک شود. تمیزی سوراخ‌ها در این آزمایش‌ها یکی از عواملی است که در کنترل پژوهشگران این تحقیق نبود، لذا فرض بر آن است که دستگاه نظارت حاضر در پروژه‌های عمرانی این شرایط را کنترل نموده‌اند.

■ انواع چسب‌های شیمیایی مورد استفاده در کاشت آرماتور

چسب‌های شیمیایی مورد استفاده در کاشت آرماتور شامل انواع مختلفی از مواد شیمیایی هستند که هر کدام دارای خواص ویژه‌ای بوده و برای کاربردهای خاصی مناسب هستند. در ادامه به بررسی سه نوع چسب شیمیایی رایج در کاشت آرماتور پرداخته می‌شود:

◆ **چسب‌های اپوکسی:** چسب‌های اپوکسی به دلیل ویژگی‌هایی چون مقاومت بالا در برابر رطوبت، حرارت و مواد شیمیایی، به‌طور گسترده‌ای در کاشت آرماتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. این چسب‌ها از دو جز تشکیل شده‌اند: رزین و سخت‌کننده که پس از مخلوط شدن، یک پیوند قوی بین آرماتور و بتن ایجاد می‌کنند. چسب‌های اپوکسی علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برجسته، قادر به تحمل نیروهای دینامیکی و لرزه‌ای نیز هستند، به‌ویژه در محیط‌هایی که نیاز به دوام و استحکام بالا دارند.

◆ **چسب‌های پلی‌استر و اکریلات:** این چسب‌ها به‌طور معمول در پروژه‌هایی با مقیاس کوچک‌تر و شرایط بارگذاری سبک‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که این چسب‌ها مقاومت کمتری نسبت به اپوکسی دارند، برای محیط‌های غیرخورنده و بدون رطوبت مناسبتر هستند. این چسب‌ها در پروژه‌هایی با نیازهای زمانی سریع نیز استفاده می‌شوند زیرا سرعت عمل‌آوری آن‌ها نسبت به اپوکسی بیشتر است.

◆ **چسب‌های رزینی:** چسب‌های رزینی از انواع قدیمی‌تر چسب‌های کاشت آرماتور هستند که هنوز هم در برخی پروژه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این چسب‌ها به دلیل ساختار شیمیایی ساده و قابلیت چسبندگی به انواع سطوح، به‌ویژه در بتن‌های سبک و پروژه‌های کوچک، به‌کار می‌روند. چسب‌های رزینی در مقابل رطوبت و شرایط خورنده مقاومت کمتری دارند؛ بنابراین، استفاده از آن‌ها در محیط‌های باز و مرطوب کمتر توصیه می‌شود.

■ عوامل مؤثر بر عملکرد کاشت آرماتور در بتن

عملکرد نهایی آرماتور کاشته شده به عوامل مختلفی بستگی دارد که به‌عنوان عوامل اساسی در طراحی و اجرای این روش مطرح هستند. از جمله این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

◆ **شرایط محیطی:** رطوبت، دما و نوع محیط (خورنده یا غیرخورنده) از جمله عوامل مهمی هستند که می‌توانند بر عملکرد چسب و استحکام نهایی آرماتور تأثیرگذار باشند. چسب‌های اپوکسی به‌طور معمول در محیط‌های مرطوب و خورنده عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند و این امر در کاشت آرماتورهایی که در تماس با مواد خورنده قرار دارند اهمیت بسیاری دارد.

◆ **نوع و کیفیت چسب:** نوع چسب و مواد تشکیل‌دهنده آن بر مقاومت نهایی و مدت زمان پایداری اتصال آرماتور تأثیر می‌گذارد. چسب‌های اپوکسی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی

■ مواد مورد استفاده

◆ **آرماتور فولادی:** برای تمام آزمایش‌ها از آرماتورهای فولادی از نوع AIII با قطر ۱۲ تا ۲۸ میلی‌متر و طول کاشت ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. لذا نتایج براساس طول کاشت و قطر آرماتور نرمالیز شده تا با یکدیگر مقایسه پذیر باشند.

◆ **چسب اپوکسی:** این چسب به دلیل مقاومت بالا در برابر نیروهای دینامیکی و رطوبت مورد استفاده قرار می‌گیرد. چسب اپوکسی به‌طور معمول برای پروژه‌هایی که نیاز به مقاومت بالا دارند توصیه می‌شود و زمان عمل‌آوری آن نیز به‌طور معمول بین ۱۲ تا ۲۴ ساعت است.

◆ **چسب اپوکسی-اکریلات:** این چسب به‌عنوان گزینه‌ای با عمل‌آوری سریع‌تر نسبت به اپوکسی انتخاب می‌شود. از این چسب برای آزمایش‌های محیطی خشک و سبک‌تر استفاده می‌شود.

■ آزمایش کشش آرماتور

آزمایش‌های کشش به‌صورت کشش محوری روی نمونه‌ها انجام شد (شکل (۱)). در این آزمایش، آرماتور کاشته شده به کمک دستگاه کشش به‌طور پیوسته کشیده می‌شود تا به نقطه شکست برسد. دستگاه کشش به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که بتواند بارگذاری محوری را به‌طور یکنواخت اعمال کند. داده‌های مربوط به نیرو و جابه‌جایی با استفاده از حسگرهای دقیق ثبت و ذخیره شدند. مقاومت کششی نهایی با توجه به نیرویی که موجب شکست نمونه می‌شود، محاسبه شد. همچنین، نوع شکست (شکست چسب، شکست آرماتور یا شکست بتن) در هر آزمایش مشخص شد. این اطلاعات برای ارزیابی چگونگی عملکرد چسب‌ها در شرایط مختلف کاشت مورد استفاده قرار گرفت.



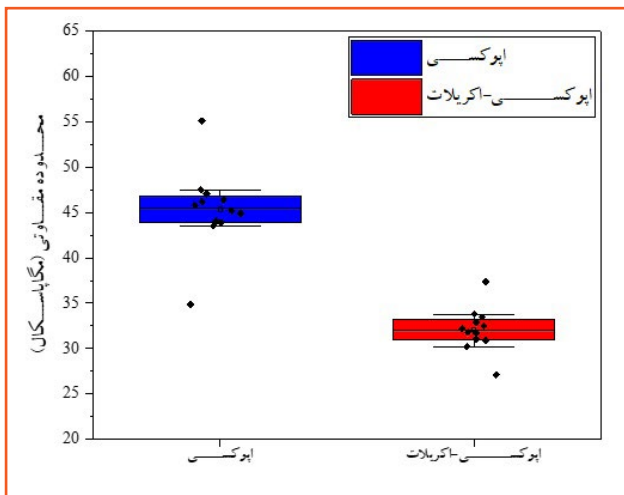
شکل (۱): نمایی از آزمایش بیرون کشی آرماتور در محل با استفاده از سیستم هیدرولیک. (الف): کاشت عمودی و (ب): کاشت افقی.

□ نتایج و بحث

■ مقایسه مقاومت کششی نهایی آرماتورها با چسب اپوکسی و اپوکسی-اکریلات

یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر نوع چسب بر مقاومت کششی آرماتورهای کاشته شده بود. نتایج آزمایش‌های کشش نشان دادند که آرماتورهای کاشته شده با چسب اپوکسی

به‌طور میانگین ۳۰ درصد مقاومت کششی بیشتری نسبت به آرماتورهای کاشته شده با چسب اپوکسی-اکریلات داشتند. این یافته می‌تواند به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چسب اپوکسی نسبت داده شود که به‌طور معمول در برابر نیروهای کششی و خمشی استحکام بالاتری از خود نشان می‌دهد. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های قبلی که استفاده از چسب‌های اپوکسی را به دلیل چسبندگی بالا و مقاومت مناسب در برابر رطوبت و مواد خوردنده توصیه می‌کنند، هم‌خوانی دارد. به نظر می‌رسد که چسب اپوکسی، به دلیل خواص پیوند شیمیایی قوی و زمان عمل‌آوری مناسب، می‌تواند به‌طور مؤثری بارهای کششی را از آرماتور به بتن انتقال دهد و در نتیجه مقاومت نهایی بالاتری را فراهم آورد. در شکل (۲) مقاومت کششی نهایی آرماتورها با چسب اپوکسی و اپوکسی-اکریلات برای ۱۰۰ آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۲): مقایسه میان تأثیر نوع چسب بر مقاومت بیرون کشی آرماتورها.

■ تأثیر جهت کاشت بر مقاومت کششی نهایی

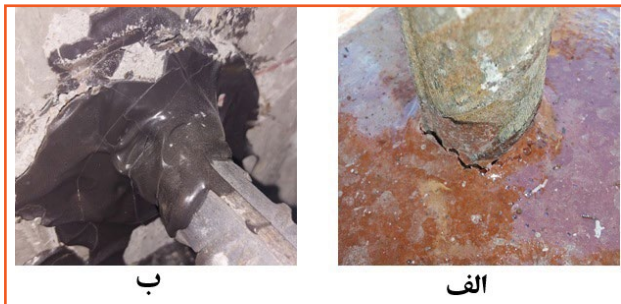
آزمایش‌ها نشان دادند که جهت کاشت آرماتور نیز بر مقاومت کششی تأثیر دارد. آرماتورهای کاشته شده در جهت عمودی به‌طور متوسط ۱۰ درصد مقاومت کششی بیشتری نسبت به آرماتورهای افقی از خود نشان دادند. این موضوع می‌تواند به چگونگی توزیع بار در طول آرماتور و ویژگی‌های فیزیکی بتن اطراف آن مرتبط باشد. در کاشت عمودی، نیروی کششی به‌صورت یکنواخت‌تری در طول آرماتور توزیع می‌شود و از تأثیر نیروهای جانبی و تنش‌های نامتقارن جلوگیری می‌کند. همچنین در کاشت عمودی چسب بهتر در فضای اطراف آرماتور توزیع می‌شود. اما در کاشت افقی به دلیل اثر نیروی گرانش و چنانچه حجم چسب کافی نباشد، چسب به‌طور یکنواخت در سرتاسر محیط آرماتور و چال حفاری شده پخش نمی‌شود. در شکل (۳) مقاومت کششی نهایی آرماتورها با چسب اپوکسی و اپوکسی-اکریلات در دو جهت افقی و عمودی برای ۱۰۰ آزمایش نشان داده شده است.

■ تحلیل نوع گسیختگی‌ها

در این بخش، تحلیل شکست‌های مشاهده شده در نمونه‌های آزمایشی مورد بحث قرار گرفته است. شکست‌ها به سه دسته اصلی تقسیم شدند: گسیختگی و ایجاد ترک در سطح چسب، گسیختگی و ایجاد ترک در بتن و گسیختگی و ایجاد ترک در فولاد آرماتور.

◆ گسیختگی و ایجاد ترک در سطح چسب:

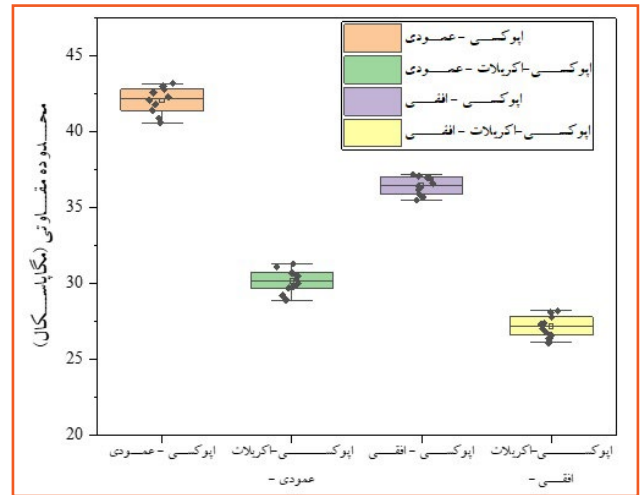
مشاهدات پژوهشگران این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین نوع شکست‌ها در این آزمایش‌ها در سطح چسب به وجود آمده که به دلیل تنش‌های کششی بالا و عدم توانایی چسب در حفظ پیوند خود با بتن است. این نوع شکست‌ها به خصوص در نمونه‌هایی که از چسب اپوکسی-اکریلات استفاده کرده بودند، بیشتر مشاهده شد و دلیل آن نیز احتمالاً به ضعف چسبندگی این چسب در شرایط بارگذاری سنگین برمی‌گردد. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، در چسب اپوکسی-اکریلات ترک بین چسب و فولاد ایجاد شده و حتی فرت نبوده تا ترک به داخل ماده چسب ورود کند یا ترک‌هایی در آن ایجاد شود. بنابراین، ایجاد و رشد ترک در باند بین فولاد و چسب رخ داده که نتیجه نامطلوبی است. اما در شکل (۴-ب) ترک ایجاد شده در خود ماده چسب است که حالت مطلوب‌تری نسبت به حالت قبل به شمار می‌رود.



شکل (۴): نمایی از ترک سطحی ایجاد شده در (الف): اپوکسی-اکریلات و (ب): رزین اپوکسی.

◆ گسیختگی و ایجاد ترک در بتن:

در برخی نمونه‌ها، شکست بتن اطراف آرماتور مشاهده شد و به‌طور معمول در نمونه‌هایی رخ داد که از چسب‌های اپوکسی استفاده شده بود. این امر به دلیل استحکام بالای چسب اپوکسی است که منجر به انتقال کامل نیروی کششی به بتن شده و موجب شکست بتن در نزدیکی آرماتور شده است. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری شدید، استفاده از چسب‌های قوی‌تر ممکن است به بتن آسیب وارد کند؛ اما در کل مطلوب‌ترین حالت گسیختگی این حالت است، چرا که نشان می‌دهد چسب استفاده شده مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن داشته و باند بین چسب با فولاد و چسب با بتن نیز استحکام کافی دارند. شکل (۵) نمایی از ترک و گسیختگی گوه‌ای در سطح بتن را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مقایسه میان تاثیر نوع چسب و جهت کاشت بر مقاومت بیرون کشی آرماتورها.

■ مقایسه نتایج با استانداردهای موجود

در این بخش، نتایج پژوهش با استانداردهای موجود از جمله استانداردهای ASTM E488 و ACI 355 مقایسه شده است. استانداردهای ASTM و ACI به‌عنوان مراجع بین‌المللی برای ارزیابی عملکرد چسب‌های شیمیایی در کاشت آرماتور شناخته می‌شوند و توصیه‌هایی در خصوص آماده‌سازی سوراخ‌ها، دمای محیط و انتخاب چسب مناسب ارائه می‌دهند. مطابق با این استانداردها، استفاده از چسب‌های اپوکسی برای محیط‌های رطوبتی و بارگذاری‌های سنگین توصیه می‌شود و نتایج این پژوهش نیز به خوبی با این استانداردها هم‌هنگ است.

◆ مقایسه با استاندارد ACI 355:

استاندارد ACI 355 به بررسی مقاومت چسب‌ها در شرایط مختلف محیطی و بارگذاری پرداخته و توصیه‌هایی در خصوص استفاده از چسب‌های شیمیایی ارائه داده است. نتایج این پژوهش نشان دادند که استفاده از چسب اپوکسی در محیط‌های مرطوب و بارهای کششی بالا، به دلیل استحکام بالای این چسب، مناسب‌تر است. این یافته با توصیه‌های استاندارد ACI 355 در خصوص استفاده از چسب‌های مقاوم در برابر رطوبت و شرایط محیطی سخت تطابق دارد [۷].

◆ مقایسه با استاندارد ASTM E488:

استاندارد ASTM E488 به ارزیابی روش‌های آزمایشگاهی و عوامل لازم برای سنجش استحکام چسب‌های شیمیایی می‌پردازد. در این پژوهش نیز با رعایت روش‌های این استاندارد، آزمایش‌ها انجام شد. استفاده از دستگاه کشش مطابق با دستورالعمل‌های ASTM و همچنین رعایت روش‌های پاکسازی سوراخ‌ها برای بهبود پیوند بین چسب و بتن، نتایج قابل اعتمادی را فراهم کرد. مشاهدات تجربی پژوهشگران نشان می‌دهد که تمیزی سوراخ و رعایت استانداردهای تزریق چسب مطابق با ASTM در عمل، منجر به افزایش مقاومت نهایی می‌شود [۸].

نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثرات نوع چسب و شرایط مختلف محیطی بر مقاومت کششی آرماتورهای کاشته شده در بتن پرداخت. در این مطالعه، دو نوع چسب اپوکسی و اپوکسی-اکریلات به عنوان مواد اتصال دهنده به کار گرفته شدند و نمونه‌ها در شرایطی همچون جهت کاشت مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که نوع چسب و جهت نصب تأثیر عمده‌ای بر مقاومت کششی نهایی آرماتورهای کاشته شده دارد.

یکی از یافته‌های اصلی این پژوهش تأثیر مثبت استفاده از چسب اپوکسی بر مقاومت کششی بود. این چسب به دلیل استحکام و مقاومت بالا در برابر رطوبت، عملکرد بهتری نسبت به چسب اپوکسی-اکریلات داشت. از آنجا که چسب اپوکسی به خوبی به بتن می‌چسبد و در شرایط رطوبتی نیز کارایی بالایی از خود نشان می‌دهد، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای ساختمانی و مقاوم‌سازی در محیط‌های مختلف شناخته شد.

علاوه بر این، تأثیر جهت کاشت نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که آرماتورهای کاشته شده در جهت عمودی نسبت به آرماتورهای افقی مقاومت کششی بیشتری دارند. این امر می‌تواند به توزیع یکنواخت‌تر نیرو در طول آرماتور مرتبط باشد که از تمرکز تنش و نیروهای جانبی می‌کاهد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای دستیابی به بهترین عملکرد آرماتورهای کاشته شده در بتن، انتخاب چسب مناسب و رعایت استانداردهای مربوط به تمیزی سوراخ‌ها و شرایط محیطی نصب بسیار مهم است. این پژوهش می‌تواند به مهندسان و متخصصان سازه کمک کند تا با در نظر گرفتن شرایط مختلف محیطی و نوع بارگذاری، تصمیمات آگاهانه‌تری برای انتخاب مواد و روش‌های بهینه نصب اتخاذ کنند. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از چسب‌های اپوکسی در پروژه‌هایی که نیاز به مقاومت و دوام بالا دارند، توصیه می‌شود.



شکل (۵): نمایشی از ترک و گسیختگی گوه‌ای شکل در سطح بتن.

◆ گسیختگی و ایجاد ترک در فولاد آرماتور:

کمترین تعداد شکست‌ها در سطح آرماتور مشاهده شد که نشان می‌دهد فولاد مورد استفاده توانایی تحمل بارهای کششی اعمال شده را داشته است. این نوع شکست‌ها به طور عمده در بارهای بسیار بالا و در شرایطی که چسب و بتن هر دو به طور کامل نیروی کششی را تحمل کرده بودند، رخ داده‌اند. همچنین در برخی موارد، به دلیل وجود ریز ترک‌ها در ساختار فولاد، مقاومت کششی می‌لگردد مورد آزمایش از میزان مورد انتظار کمتر است. در شکل (۶) تصویر یک نمونه گسیختگی در فلز آرماتور مشاهده می‌شود.



شکل (۶): (الف): نمایشی از گسیختگی ایجاد شده در فولاد و (ب): نمای فولاد سالم با همان شرایط کاشت و ترک ایجاد شده در بتن.

مرجع

- [1] Subramanian, N., & Cook, R. A. (2002). Installation, behaviour and design of bonded anchors. *Indian Concrete Journal*, 76(1), 47-56.
- [2] Eligehausen, R., & Cook, R. A. (2006). Behavior and design of adhesive bonded anchors. *ACI Structural Journal*, 103(6), 822.
- [3] Baryłka, A., & Tomaszkiwicz, D. (2020). Influence of surface shape of glued anchors on their load capacity. *Modern Engineering*, (2), 78-82.
- [4] Nilforoush, R., Nilsson, M., Söderlind, G., & Elfgren, L. (2016). Long-term performance of adhesive bonded anchors. *ACI Structural Journal*, 113(2), 251-261.
- [5] Upadhyaya, P., & Kumar, S. (2015). Pull-out capacity of adhesive anchors: An analytical solution. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 60, 54-62.
- [6] Chen, J., Liu, P., Liu, L., Zeng, B., Zhao, H., Zhang, C., ... & Li, D. (2022). Anchorage performance of a modified cable anchor subjected to different joint opening conditions. *Construction and Building Materials*, 336, 127558.
- [7] Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete (ACI 355.4-20) and Commentary – Inch-Pound Units (IN-LB)
- [8] ASTM, E488M-15, Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements

نویسندگان

سجاد رضانی جلفایی^{۱*}حسین محمدی^۲، مازبار نادر اصلی^۳

۱. کارشناس بخش تحقیق و توسعه شرکت آزمون فولاد

۲. سرپرست بخش تحقیق و توسعه شرکت آزمون فولاد

۳. مدیر بازرسی فنی شرکت آزمون فولاد

*Sajadr.j1993@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

تفسیر فیلم رادیوگرافی با استفاده از هوش مصنوعی و روش‌های پردازش تصویر



واژه‌های کلیدی

هوش مصنوعی، پردازش تصویر، رادیوگرافی صنعتی، بازرسی غیرمخرب.



چکیده

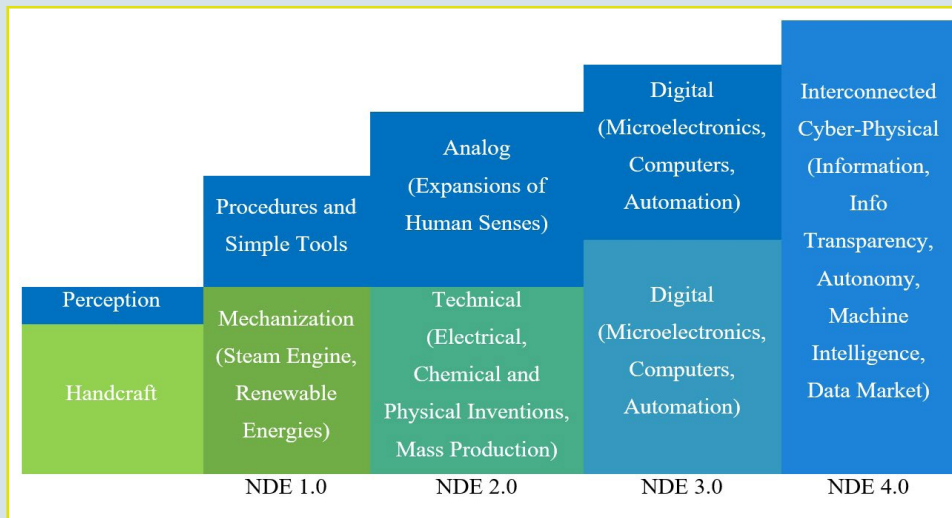
امروزه از هوش مصنوعی و پردازش تصویر برای تحلیل دقیق تصاویر رادیوگرافی جوش‌های صنعتی در بازرسی‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. این سیستم با بهبود کیفیت و کاهش نویز تصاویر، به شناسایی و طبقه‌بندی خودکار عیوب در جوش می‌پردازد. بهره‌گیری از یادگیری عمیق به کاهش وابستگی به تفسیر انسانی کمک کرده و عوامل خارجی را محدود می‌سازد. این فناوری به بازرسان و مهندسان جوش در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و خودروسازی امکان تحلیل سریع و دقیق داده‌ها را می‌دهد و بازدهی و ایمنی فرآیندهای صنعتی را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

آزمون غیرمخرب^۱ نقش اساسی در بازرسی زیرساخت‌ها در صنایع گوناگون دارد و در جایی که پایش مستمر برای تضمین کیفیت محصولات دارای اهمیت است، نگهداری از زیرساخت‌های فرسوده و ایمنی تجهیزات عملیاتی ضرورت دارد. هدف اصلی آزمایش‌های NDT، ارزیابی وضعیت نمونه‌ها است که خطر خرابی‌های احتمالی را بدون ایجاد آسیب کاهش می‌دهد؛ برخلاف روش‌های مخرب که باعث از بین رفتن نمونه می‌شوند. روش‌های متنوع NDT، مانند نشت شار مغناطیسی، جریان گردابی، رادیوگرافی و اولتراسونیک، به دلیل هزینه‌های بالای خرابی‌ها و ضرورت حفظ ایمنی در صنایع حساسی همچون انرژی و حمل‌ونقل به کار می‌روند. در سال‌های اخیر، نیاز به بازرسی‌های سریع، دقیق و مقرون به صرفه افزایش یافته است و این امر موجب تحول NDT از روش‌های سنتی به سیستم‌های داده‌محور و خودکار با عنوان «NDT 4» شده است که با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، علاوه بر افزایش بهره‌وری، به کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی زیرساخت‌ها کمک می‌کند [۱].

انقلاب صنعتی چهارم^۲ که نخستین بار در سال ۲۰۱۱ در نمایشگاه هانو فرمسه^۳ آلمان معرفی شد، تحولی را آغاز کرد که با هوشمندسازی گسترده در سیستم‌های تولید و توزیع، صنایع مختلف را به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای ارتقای کیفیت و بهره‌وری سوق داد. این انقلاب، مفهومی جامع برای استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند اینترنت اشیا^۴، هوش مصنوعی^۵، داده‌های بزرگ^۶، ارتباطات نسل پنجم مخابرات^۷

است. به موازات آن، مفهوم نسل چهارم آزمون‌های غیرمخرب (NDT 4) که به بازرسی هوشمند معروف است، برای همگام‌سازی آزمون‌های غیرمخرب با این تحولات هوشمند شکل گرفته است. NDT 4 با افزایش دقت و شفافیت ارزیابی‌ها و خودکارسازی فرآیندهای بازرسی، به یکی از ارکان اساسی انقلاب صنعتی چهارم تبدیل شده‌است و با تکیه بر هوش مصنوعی و پردازش داده‌های پیشرفته، ارزیابی‌ها در روش‌های مختلف NDT نظیر رادیوگرافی را بهبود می‌بخشد و تضمین ایمنی و کیفیت در صنایع را فراهم می‌سازد [۲].

شکل (۱) نمایشی از چهار انقلاب صنعتی و همچنین انقلاب‌های مربوط به NDT را نشان می‌دهد. انقلاب‌ها در NDT لزوماً با همان ترتیب زمانی رخ نداده‌اند و در بیشتر موارد با تأخیر نسبت به انقلاب‌های صنعتی به وقوع پیوسته‌اند. این ساختار نشان می‌دهد که محور (x) شکل را نباید به‌عنوان یک جدول زمانی دقیق در نظر گرفت.



شکل (۱): نمایشی از چهار انقلاب صنعتی و همچنین انقلاب‌های مربوط به آزمون‌های غیرمخرب NDT در زمان‌های مختلف [۲].

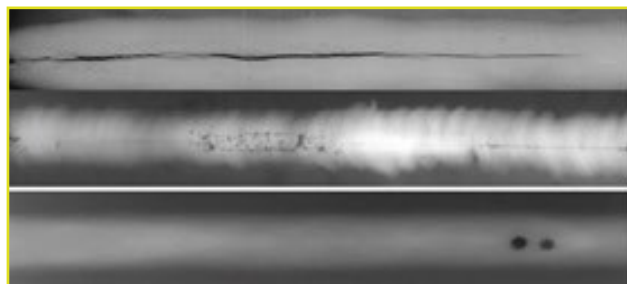
تاریخچه آزمون‌های غیرمخرب با هر دوره از انقلاب‌های صنعتی پیشرفت کرده است. نسل اول آزمون‌های غیرمخرب (NDT 1) هم‌زمان با انقلاب صنعتی اول شکل گرفت و از ابزارهای ساده‌ای مانند ذره‌بین و ضربه برای تقویت حس‌های انسانی در بازرسی‌ها استفاده می‌شد. در نسل دوم آزمون‌های غیرمخرب (NDT 2) که با انقلاب صنعتی دوم و ورود برق همراه بود، ابزارهای آنالوگ مانند امواج فراصوت و اشعه ایکس، امکان دیدن فراتر از حس‌های انسانی را فراهم کردند. نسل سوم آزمون‌های غیرمخرب (NDT 3) در انقلاب صنعتی سوم با ظهور فناوری‌های هوشمند، قابلیت‌های جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌ها را گسترش داد و حسگرهای هوشمند و تصویرسازی دو و سه‌بعدی را معرفی کرد. اکنون در NDT 4، ابزارهای هوشمند و روش‌های فیزیکی به‌صورت یکپارچه عمل می‌کنند تا داده‌های کاملی از تولید تا نگهداری جمع‌آوری شود و در این مرحله، عملکرد بازرسی‌ها به سطح بالاتری از دقت و خودکارسازی رسیده است [۲].

هوش مصنوعی در NDT 4 امکان بازرسی هوشمند، دقیق و خودکار را فراهم می‌کند. در واقع، هوش مصنوعی مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها و روش‌ها است که به ماشین‌ها این توانایی را می‌دهد که مانند انسان‌ها یاد بگیرند و تصمیم‌گیری کنند. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، شبکه عصبی پیچشی^۵ است که به‌طور ویژه برای پردازش داده‌های تصویری طراحی شده و به‌صورت مؤثر ویژگی‌های تصاویر را استخراج کرده و الگوهای پیچیده را شناسایی می‌کند [۵]. این روش به ویژه در پردازش تصاویر، مانند فیلم‌های رادیوگرافی جوش، کاربرد دارد. پردازش تصویر در این زمینه به معنای استخراج ویژگی‌ها و اطلاعات از تصاویر است که به شناسایی عیوب جوش کمک می‌کند. ترکیب هوش مصنوعی، شبکه عصبی پیچشی و پردازش تصویر، این امکان را فراهم می‌آورد که به‌طور خودکار و دقیق، تصاویر رادیوگرافی جوش را تحلیل کنیم. این روش‌ها به ویژه در رادیوگرافی هوشمند که تصاویر با وضوح بالاتر و تعداد بیشتری در دسترس هستند، کارایی بالاتری دارند. در واقع، این سیستم‌ها می‌توانند نقص‌های جوش را با دقت بالا شناسایی کنند، به ویژه در مواردی که تصاویر با کیفیت بالا از جوش‌های با قطر بزرگ در یک کارخانه صنعتی بررسی می‌شود. طبق مطالعات بازار، پیش‌بینی می‌شود که بازار شناسایی تصاویر از ۲۶ میلیون دلار در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۵۰ میلیون دلار تا سال ۲۰۲۵ برسد. این روند، نشان‌دهنده رشد قابل توجه استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل تصاویر صنعتی و کاربردهای مختلف آن است [۴].

□ رادیوگرافی

رادیوگرافی از اشعه ایکس یا گاما برای تولید تصویر از داخل مواد و اجسام استفاده می‌کند که در شناسایی عیوب داخلی به ویژه در جوش‌ها کاربرد دارد. در این روش، تابش اشعه به داخل ماده نفوذ می‌کند و بسته به نوع و چگالی ماده و میزان انرژی تابش، بخشی از آن جذب و یا از ماده عبور می‌کند. شدت تابش دریافت‌شده در سمت دیگر شیء، اطلاعاتی درباره چگالی و ساختار داخلی آن فراهم می‌کند که می‌تواند نشانگر نقص‌ها یا تغییرات در ضخامت ماده باشد.

در رادیوگرافی، عیوب جوش باعث تغییر در چگالی ماده می‌شوند که این تغییرات در تصاویر رادیوگرافی به صورت اختلاف در شدت رنگ‌ها نمایان می‌شوند. هر چند این روش برای شناسایی برخی نقص‌ها مناسب است، اما در تشخیص و تعیین ابعاد ترک‌های کوچک در ضخامت ماده دقت کافی ندارد. بنابراین، در مواردی که نیاز به دقت بالا برای شناسایی نقص‌های سطحی و یا ابعاد دقیق عیوب داخلی وجود دارد، رادیوگرافی ممکن است به‌عنوان تنها روش کافی نباشد و نیاز به روش‌های تکمیلی باشد. این روش به‌عنوان یکی از روش‌های موثر در NDT به‌ویژه برای تشخیص و شناسایی عیوب داخلی جوش‌ها به کار گرفته می‌شود. شکل (۲) ظاهر برخی از عیوب جوش را در تصاویر رادیوگرافی نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمونه‌های آزمون رادیوگرافی از عیوب جوش [۵].

□ عیوب جوشکاری

در بازرسی‌های جوش، شناسایی و تحلیل عیوب جوشکاری که ناشی از عوامل مختلفی مانند تنش‌های حرارتی، فرآیندهای غیراستاندارد جوشکاری و شرایط محیطی نامساعد هستند، به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین فعالیت‌ها در راستای اطمینان از کیفیت و دوام ساختارها شناخته می‌شود. شدت این عیوب و اثرگذاری آن‌ها بر استحکام و ایمنی سازه، بسته به نوع، موقعیت و اندازه عیوب و همچنین نوع بارگذاری (استاتیکی یا دینامیکی) متفاوت است. در نتیجه، تفسیر دقیق فیلم‌های

رادیوگرافی به‌ویژه برای شناسایی عیوب داخلی جوش، یکی از مهم‌ترین مراحل بازرسی محسوب می‌شود.

ترک‌های طولی و عرضی، تخلخل‌های گازی، نفوذ ناقص، همجوشی ناقص و بریدگی‌های کناری، نمونه‌هایی از عیوب رایج در جوشکاری هستند که هر یک به روش خاصی روی فیلم‌های رادیوگرافی نمایان می‌شوند. ترک‌ها، به‌خصوص ترک‌های طولی و عرضی که در اثر تنش‌های داخلی و یا انقباض و انبساط فلز حین سرد شدن ایجاد می‌شوند، می‌توانند در سطح جوش، ریشه جوش و یا در تمامی مقاطع جوش دیده شوند. این ترک‌ها از نظر خطرات بالقوه، به دلیل ایجاد تمرکز تنش بالا در محل ترک، می‌توانند به شکست زودرس ساختار منجر شوند. در تفسیر فیلم‌های رادیوگرافی، ترک‌ها به‌طور معمول به‌صورت خطوط تیره و باریک نمایان می‌شوند و موقعیت آن‌ها نسبت به ریشه و سطح جوش اهمیت زیادی دارد [۴].

در موارد دیگر، تخلخل‌های گازی ناشی از محبوس شدن گازهای آزاد شده در طول فرآیند جوشکاری و یا ناشی از مواد باقی‌مانده از ریخته‌گری هستند. این عیوب که به‌صورت نقاط تیره و کوچک روی فیلم ظاهر می‌شوند، ممکن است در عمق جوش پراکنده شده و بسته به اندازه و تعدادشان بر کیفیت جوش تأثیرگذار باشند. استانداردهای بازرسی میزان پذیرش و یا رد این تخلخل‌ها را با توجه به نوع بارگذاری و موقعیت عیب تعیین می‌کنند.

چاله‌های انتهایی جوش که به‌دلیل قطع ناگهانی قوس الکتریکی و یا تمام شدن الکتروود به‌وجود می‌آیند، اغلب در نواحی پایانی جوش قابل مشاهده‌اند. این نواحی باید با جوشکاری مجدد و پر کردن تا سطح معین، به‌طور کامل جبران شوند، زیرا در غیر این صورت می‌توانند محل تجمع تنش و ایجاد ترک‌های ثانویه شوند.

یکی دیگر از عیوب مهم، نفوذ ناقص است و هنگامی رخ می‌دهد که فلز جوش به‌طور کامل در عمق اتصال نفوذ نکند. این عیب که روی فیلم رادیوگرافی به‌صورت یک خط تیره و باریک در ناحیه ریشه جوش دیده می‌شود، می‌تواند به‌طور چشم‌گیری از استحکام ساختار بکاهد، به‌خصوص در بارگذاری‌های دینامیکی و نواحی با تنش بالا. در این موارد، عمق نفوذ جوش باید به‌گونه‌ای باشد که تمامی مقاطع اتصال را دربر گیرد تا از تمرکز تنش در ریشه جلوگیری شود.

بریدگی‌های کناری جوش نیز یکی دیگر از عیوب سطحی هستند که به دلیل تنظیم نادرست عوامل جوشکاری و یا کنترل ضعیف روش جوشکاری ایجاد می‌شوند. این بریدگی‌ها که در مرز بین فلز پایه و فلز جوش به وجود می‌آیند، ممکن است در بارگذاری‌های استاتیکی قابل پذیرش باشند، اما در بارگذاری‌های دینامیکی، می‌توانند به گسترش ترک‌ها و کاهش عمر سرویس قطعه منجر شوند.

همه این عیوب که روی فیلم‌های رادیوگرافی قابل شناسایی هستند، نیازمند دقت بالایی در تفسیر و تحلیل‌اند. با

قادرند که با بهبود کیفیت تصاویر، حذف نویز، افزایش کنتراست و شناسایی خودکار الگوهای عیوب، دقت و کارایی فرآیند بازرسی را افزایش دهند. به‌ویژه، شبکه‌های عصبی پیچشی و مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق، می‌توانند تصاویر رادیوگرافی را پردازش کرده و عیوب را با دقت بالاتری شناسایی کنند، که این امر نقش مؤثری در بهبود دقت و سرعت بازرسی‌های جوش ایفا می‌کند.

جدول (۱) به تعریف عیوبی می‌پردازد که با استفاده از هوش مصنوعی و روش‌های پردازش تصویر در این فناوری قابل تشخیص و شناسایی هستند.

جدول (۱): عیوب جوش متداول قابل تشخیص با پردازش تصویر [۴].

| نوع ناپیوستگی | نماد | توضیحات |
|------------------|-----------------------------|--|
| ترک | Crack (C) | نقصی که با یک شکست ایجاد می‌شود و به‌طور معمول از تنش‌های تولید شده در حین خنک شدن ناشی می‌شود. این نوع نقص به‌عنوان ورود هیدروژن در مناطق سطحی یا زیر سطحی جوش شناخته می‌شود. این نقص جدی‌ترین نوع عیب در جوش است و باید حذف شود. |
| ذوب ناقص جوش | Lack of Fusion (L.O.F) | یک ناپیوستگی جوش که در آن همجوشی بین فلز جوش و سطوح همجوشی و یا ردیف‌های مجاور جوش اتفاق نمی‌افتد. این نقص به دلیل عدم اتصال فلز پرکننده به فلز پایه مجاور رخ می‌دهد زیرا سطح فلز پایه در حین جوشکاری به دمای ذوب نرسیده است. |
| تخلخل | Porosity (P) | حفره‌های کوچک و یا سوراخ‌هایی که بیشتر شکلی کروی دارند. تخلخل زمانی رخ می‌دهد که برخی از اجزای فلز مذاب بخار شده و باعث ایجاد حباب‌های گاز کوچک می‌شوند که در فلز به هنگام انجماد به دام می‌افتند. این حفره‌ها به‌طور معمول شکلی کروی دارند. |
| حفره‌های خوشه‌ای | Cluster Porosity (C.P) | تخلخل معمولی در رادیوگرافی که به‌صورت یک گروه خوشه‌ای بسته دیده می‌شود. به‌طور کلی، علت این نوع تخلخل، آلودگی الکترودهای پوشش‌دار با رطوبت است. رطوبت در اثر حرارت در حین فرآیند جوشکاری به گاز تبدیل و در جوش محبوس می‌شود. |
| ناخالصی سرباره | Slag Inclusions (S.I) | این ناپیوستگی بیشتر در جوشکاری با قوس محافظت شده اتفاق می‌افتد و زمانی رخ می‌دهد که سرباره قادر به شناور شدن به سطح فلز مذاب نبوده و در حین انجماد در فلز جوش به دام می‌افتد. |
| ناخالصی تنگستن | Tungsten Inclusions (TI) | این نوع نقص در فلز جوش ایجاد شده توسط جوشکاری قوس تنگستن با گاز یافت می‌شود و به دلیل تماس الکتروود تنگستن با فلز مذاب ایجاد می‌شود. |
| نفوذ ناقص | Lack of penetration (L.O.P) | این عیب زمانی که فلز جوش نتواند به‌طور کامل در درز جوش نفوذ نماید پدید می‌آید. این عیب یکی از مخرب‌ترین عیوب جوش است. LOP سبب می‌شود تا تنش‌های موضعی ایجاد گشته و باعث ایجاد ترک شود. |
| تقعر ریشه | R.C | شیار کم عمقی است که در ریشه جوش‌های نفوذی با اتصال لب به لب به دلیل انقباض جوش ایجاد می‌شود. به‌طور معمول اگر در طرح اتصال درز جوش از اندازه مجاز بیشتر باشد و فضای اضافی در این ناحیه ایجاد کند، انقباض فلز مذاب جوش می‌تواند منجر به بروز این عیب شود. |

می‌کند. این سیستم‌های هوشمند به‌صورت خودکار به تحلیل داده‌های تصویری پرداخته، الگوها و ناهنجاری‌ها را شناسایی کرده و عیوب را دسته‌بندی می‌کنند.

پردازش تصویر که شامل بازسازی، بهبود و تفسیر محتوای تصاویر است، در رادیوگرافی هوشمند نقشی کلیدی ایفا می‌کند. الگوریتم‌های بینایی ماشین^{۱۲}، با استفاده از قدرت پردازشی پیشرفته رایانه‌ها، قادرند به‌طور خودکار فرآیندهایی مانند بازسازی اثرات خرابی در تصاویر و شناسایی ویژگی‌ها را انجام دهند. این فناوری نه‌تنها برای بهبود کیفیت تصاویر استفاده می‌شود، بلکه در جداسازی نواحی مختلف تصویر برای تشخیص دقیق عیوب نیز کاربرد دارد. چنین تحلیل دقیقی، به‌ویژه برای بازرسی‌های غیرمخرب که نیازمند دقت بالا

این حال، عوامل متعددی مانند نویز تصویر، کنتراست پایین، ناهمگونی توزیع خاکستری و خستگی بازرسان می‌توانند منجر به خطاهای قابل توجهی در تشخیص و تفسیر عیوب شوند. کیفیت پایین تصاویر، به‌ویژه برای شناسایی عیوب کوچک و غیر واضح، می‌تواند روند بازرسی را با چالش‌هایی مواجه سازد و در برخی موارد به بروز خطاهای جدی در ارزیابی منجر شود.

با استفاده از روش‌های پردازش تصویر و فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش مصنوعی و یادگیری عمیق، می‌توان این چالش‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش داد. این فناوری‌ها

□ هوش مصنوعی در رادیوگرافی و تشخیص عیوب جوش

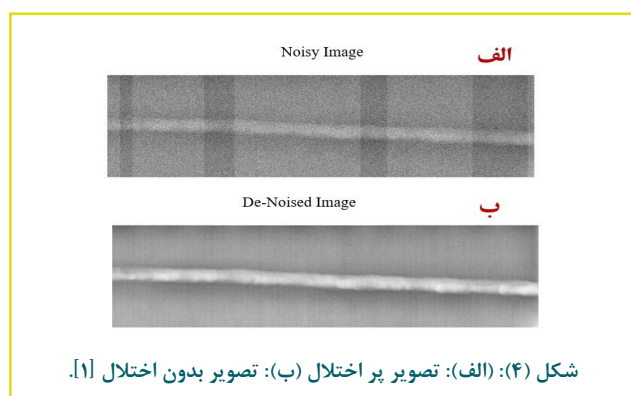
رادیوگرافی هوشمند با استفاده از پردازش تصویر^۹ و یادگیری ماشین^{۱۰}، به‌عنوان بخشی از انقلاب NDT 4، نقش قابل توجهی در افزایش کارایی و دقت تشخیص عیوب در صنایع و نیروگاه‌ها ایفا می‌کند. در این زمینه، هوش مصنوعی به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته شده و بهبود چشمگیری در کاهش خطاهای انسانی، ارتقاء دقت و تحلیل سریع‌تر نتایج بازرسی به همراه داشته است. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق^{۱۱} به توانایی سیستم‌ها برای تحلیل تصاویر و شناسایی عیوبی که شناسایی آن‌ها برای چشم انسان دشوار است کمک

روش مورد استفاده برای تشخیص عیب

نرم‌افزار تفسیر فیلم‌های رادیوگرافی با استفاده از هوش مصنوعی شامل چندین مرحله کلیدی است که از ابزارهای مختلف پردازش تصویر، یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی پیچشی بهره می‌گیرد. این مراحل شامل پردازش تصویر، استخراج ویژگی‌ها، شناسایی نقص‌ها و طبقه‌بندی هستند و در هر بخش از هوش مصنوعی به روش‌های خاصی استفاده می‌شود تا اطلاعات دقیق‌تری برای بازرس فراهم شود. این فناوری کمک می‌کند که در یک فرآیند خودکار و سریع، به‌صورت دقیق و با حداقل خطای انسانی به بررسی عیوب احتمالی در تصاویر رادیوگرافی پرداخته شود [۶].

مراحل در این فرآیند به این صورت است که در مرحله اول، در فرآیند پردازش تصاویر رادیوگرافی با استفاده از هوش مصنوعی، ابتدا تصاویر برای حذف اختلال و بهبود کیفیت آماده‌سازی می‌شوند. این مرحله شامل چندین زیرفرآیند است که هر یک برای بهبود وضوح و قابلیت شناسایی عیوب جوش اهمیت دارند. در گام نخست، اختلال‌های مختلفی که در تصویر وجود دارند و می‌توانند شناسایی دقیق نقص‌ها را دشوار کنند، با استفاده از فیلترهای تصویری و الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی پیچشی شناسایی و حذف می‌شوند. حذف این اختلال‌ها باعث افزایش کنتراست و وضوح تصویر شده و امکان شناسایی دقیق‌تر جزئیات را فراهم می‌کند [۱].

این امر نرخ شناسایی عیوب توسط ناظر انسانی را بهبود بخشیده و همچنین زمان صرف شده برای بررسی یک تصویر را کاهش می‌دهد. مثالی در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن تصویر جوش دارای اختلال (الف) با چندین دانه‌بندی اختلال مختلف نمایش داده شده است. اگر یک الگوریتم هوش مصنوعی بتواند تصویر را بازسازی کرده و به انواع مختلف اختلال به‌طور خودکار واکنش نشان دهد، می‌تواند آن را به تصویری با اختلال کمتر (ب) تبدیل کند و در عین حال جزئیات اصلی تصویر را حفظ نماید. مزیت چنین الگوریتم هوش مصنوعی این است که ویژگی‌های محلی (مانند عیوب، لبه‌های جوش، پس‌زمینه و غیره) می‌توانند براساس موقعیت مکانی‌شان به‌طور متفاوتی پردازش شوند [۱].

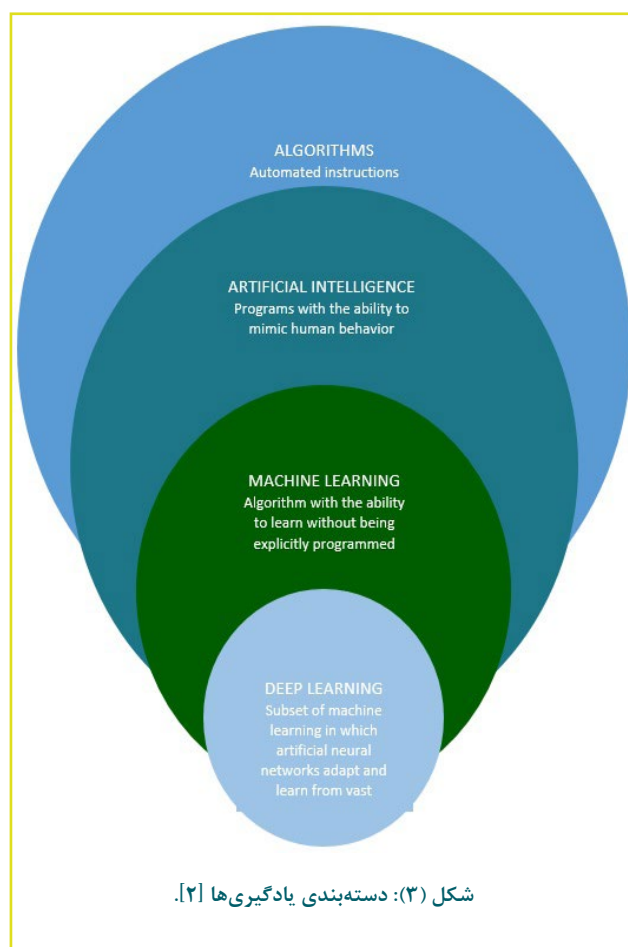


هستند، اهمیت دارد [۶].

از سوی دیگر، یادگیری ماشین با استفاده از الگوریتم‌های خاص مانند شبکه‌های عصبی پیچشی، به این سیستم‌ها امکان می‌دهد تا داده‌ها را به‌صورت خودکار یاد بگیرند و به دسته‌بندی و تحلیل عیوب بپردازند. شبکه‌های عصبی، با الهام از ساختار مغز انسان، اطلاعات را به‌صورت لایه‌های متوالی پردازش می‌کنند و به‌ویژه برای تحلیل الگوهای پیچیده و داده‌های بزرگ کاربرد دارند. یادگیری عمیق، به‌عنوان زیرشاخه‌ای از یادگیری ماشین، از لایه‌های متعدد پردازشی برای ایجاد سلسله مراتب ویژگی‌ها بهره می‌برد و توانایی کشف روابط پیچیده بین داده‌ها را دارد [۶].

با استفاده از این فناوری‌ها، فرآیندهای بازرسی در NDT ۴ دقیق‌تر، سریع‌تر و اقتصادی‌تر شده و هزینه‌های نگهداری کاهش یافته است. این روش‌ها در کنار کاهش خطای انسانی، موجب افزایش اطمینان در بازرسی‌ها و ارتقاء کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده شده‌اند. به‌کارگیری موفق این سیستم‌ها نیازمند دانش تخصصی در بازرسی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است تا خروجی‌های دقیق و قابل اعتمادی ارائه و اطمینان حاصل شود که فرآیند بازرسی نه تنها کارآمد، بلکه ایمن و مقرون به صرفه خواهد بود.

همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، الگوریتم‌های یادگیری ماشین زیرمجموعه‌ای از الگوریتم‌ها هستند که توانایی تقلید رفتار انسان را دارند.



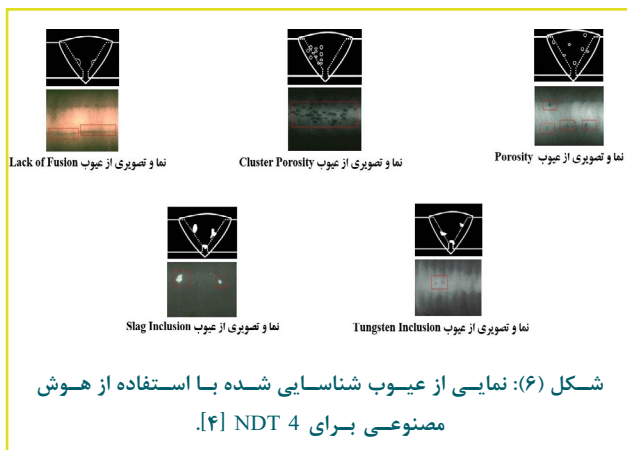
تعریف دستی ویژگی‌ها انجام می‌شود؛ شبکه به‌طور خودکار ویژگی‌های مهم را از تصاویر آموزش دیده می‌آموزد و برای شناسایی نقص‌ها آماده می‌شود.

در مرحله شناسایی نقص‌ها، ویژگی‌های استخراج شده از مرحله قبل، به مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و الگوریتم‌های یادگیری داده می‌شوند. این الگوریتم‌ها، وظیفه طبقه‌بندی و شناسایی دقیق عیوب را بر عهده دارند و قادرند عیوب مختلف، از جمله ترک‌ها، حفره‌ها و انحرافات ساختاری را شناسایی کنند. این مدل‌ها براساس داده‌های برچسب‌گذاری شده از عیوب قبلی آموزش دیده‌اند و با مقایسه ویژگی‌های استخراج شده از تصویر جدید با الگوهای شناخته شده، تشخیص می‌دهند که آیا عیبی وجود دارد یا خیر و اگر وجود دارد نوع آن چیست.

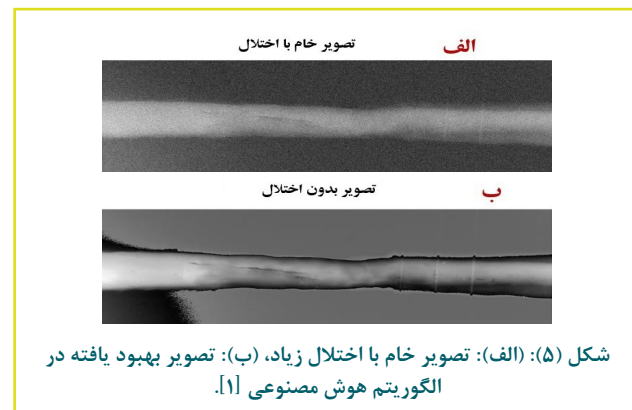
در پایان، نقص‌ها براساس نوع و شدت دسته‌بندی می‌شوند. در این مرحله از الگوریتم‌های طبقه‌بندی یادگیری عمیق استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی پیچشی می‌توانند با تحلیل الگوهای شناسایی شده، عیوب را به دسته‌های مختلفی مانند ترک‌ها، حفره‌ها و تغییر شکل‌ها تقسیم کنند. این تحلیل به بازرسان این امکان را می‌دهد که نه تنها نوع عیب، بلکه شدت و موقعیت آن را نیز ارزیابی کنند [۶].

از آنجایی که این روش نیاز به مداخله انسانی را کاهش می‌دهد، احتمال بروز خطاهای انسانی نیز به حداقل می‌رسد. به‌ویژه در صنایع پیچیده مانند نفت و گاز و صنایع سنگین، این دقت و سرعت بالا به حفظ ایمنی و افزایش کارایی کمک می‌کند.

همچنین، سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند با داده‌های جدید به روز شوند و الگوهای جدید را یاد بگیرند، که این امر به معنای قابلیت ارتقاء و سازگاری سیستم‌ها با تغییرات صنعتی است. این انعطاف‌پذیری و پایداری، هوش مصنوعی را به ابزاری ارزشمند و کارآمد برای بازرسی‌های صنعتی تبدیل می‌کند که می‌تواند سلامت و کیفیت سازه‌ها و تجهیزات را به شکل قابل اعتمادی پایش کند. شکل (۶) عیوب شناسایی شده با استفاده از هوش مصنوعی برای NDT 4 را نشان می‌دهد.



به جز حذف اختلال، شکل (۵) نمونه‌ای از بهبود تصویر را نشان می‌دهد که در آن یک ترک در جوش قابل مشاهده است. بسته به محدوده مقادیری که به ناظر انسانی ارائه می‌شود، عمق‌های مختلفی دیده می‌شود. بنابراین، در بیشتر موارد ناظر نیاز دارد که دو یا سه نمای متفاوت را بررسی کند تا بتواند تمامی عیوب را در تمام عمق‌ها به‌طور کامل مشاهده کند [۱]. سپس تغییرات هندسی مانند تغییر اندازه، چرخش و برش بخشی از تصویر به‌کار گرفته می‌شود تا ابعاد و زوایای تصویر با مدل پردازشی مطابقت بیشتری داشته باشند. پس از آن، تنظیمات مختلفی نظیر افزایش کنتراست، اصلاح گاما و تنظیم روشنایی اعمال می‌شود. این بهبودها باعث می‌شوند که بخش‌های مهم تصویر با دقت بیشتری قابل مشاهده باشند و جزئیات مورد نیاز برای شناسایی نقص‌ها بهتر نمایان شوند. این تنظیمات به شبکه‌های عصبی کمک می‌کنند تا ویژگی‌های مهم تصویر را با دقت بیشتری تشخیص دهند. درنهایت، اطلاعات پردازش شده و به‌دست آمده از تصویر ذخیره می‌شود تا در مراحل بعدی پردازش، مانند شناسایی و طبقه‌بندی عیوب، مورد استفاده قرار گیرد. مجموعه این فرآیندها موجب می‌شود که تصویر رادیوگرافی نهایی، از لحاظ وضوح و کیفیت، به بهترین حالت ممکن برای تحلیل هوش مصنوعی برسد و عیوب و نواقص به‌صورت دقیق و قابل اعتماد شناسایی شوند [۱].



پس از آماده‌سازی تصویر، مرحله استخراج ویژگی‌ها آغاز می‌شود. شبکه‌های عصبی پیچشی در این مرحله نقش حیاتی ایفا می‌کنند. این شبکه‌ها از لایه‌های پیچشی برای شناسایی الگوهای مختلف در تصویر استفاده می‌کنند. لایه‌های اولیه شبکه، ویژگی‌های ابتدایی مثل لبه‌ها و زوایا را شناسایی می‌کنند، در حالی که لایه‌های عمیق‌تر به شناسایی ویژگی‌های پیچیده‌تری نظیر ترک‌ها، حفره‌ها و عیوب ساختاری می‌پردازند. در این مرحله، شبکه در اصل اطلاعات مهم تصویر را جمع‌آوری می‌کند اما هنوز به تشخیص نهایی نقص‌ها نمی‌پردازد و داده‌های خام مربوط به نقص‌های احتمالی را استخراج کرده و آن‌ها را به‌عنوان ورودی برای مراحل بعدی آماده می‌کند. این مرحله بدون نیاز به

اجرای پروژه NDT 4 در صنایع مختلف، صرفاً یک ارتقاء در روش‌های بازرسی محسوب نمی‌شود، بلکه تحولی بنیادین در مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های حیاتی صنایع است. این فناوری دقت و سرعت بی‌نظیری در تشخیص عیوب فراهم کرده و با اتوماسیون هوشمندانه فرآیندهای بازرسی، امکان پایش مداوم تجهیزات به صورت آنلاین را ممکن می‌سازد. این فناوری اجازه می‌دهد عیوب پیش از بروز خرابی جدی شناسایی شوند و توقف‌های غیرمنتظره به طور چشمگیری کاهش یابند که به حفظ ایمنی تجهیزات و افراد کمک شایانی می‌کند. NDT 4 همچنین به کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش عمر مفید تجهیزات و بهبود بهره‌وری می‌انجامد و در نتیجه، ارزش دارایی‌های شرکت افزایش می‌یابد. با بهینه‌سازی فرآیندهای تعمیر و نگهداری و به کارگیری روش‌های پیشرفته، کاهش هزینه‌های بلند مدت در صنایع تحقق می‌یابد.

از نظر زیست محیطی، این پروژه اثرات مثبت چشم‌گیری دارد؛ به واسطه دقت بالای این فناوری و امکان شناسایی دقیق نشتی‌ها و خوردگی‌ها پیش از گسترش، احتمال انتشار آلاینده‌ها به محیط زیست به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بهبود بهره‌وری انرژی نیز از دیگر دستاوردهای این پروژه است که با افزایش عمر مفید تجهیزات و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، به کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود. همچنین، داده‌های دقیق NDT 4 امکان برنامه‌ریزی بهینه برای مدیریت پسماندهای صنعتی را فراهم کرده و مانع از دفع غیرمسئولانه آن‌ها در محیط زیست می‌شود.

همچنین اجرای این فناوری، ایمنی پرسنل و تجهیزات را افزایش داده و خطر مواجهه با مواد خطرناک و وقوع حوادث صنعتی را کاهش می‌دهد؛ شناسایی و رفع عیوب پیش از بروز خطر، ایمنی کارکنان را ارتقا داده و احتمال وقوع حوادث را به حداقل می‌رساند. افزون بر این، با افزایش پایداری زیرساخت‌ها و بهبود آمادگی در برابر بحران‌ها، آسیب‌پذیری صنایع در برابر تهدیدات مختلف کاهش می‌یابد. پایداری زیرساخت‌ها نه تنها به عنوان یک عامل کلیدی در حفاظت از دارایی‌های شرکت مطرح است، بلکه در برابر حملات احتمالی نیز ایمنی بیشتری فراهم می‌کند و این صنعت را در مسیر توسعه پایدار هدایت می‌کند. در مجموع، NDT 4 با تأثیرات گسترده و چندجانبه‌ای که بر عملکرد، پایداری، ایمنی و بهره‌وری دارد، گامی اساسی در راستای ارتقاء کیفیت و مدیریت منابع در صنایع به شمار می‌آید.

بی‌نوشت

- | | |
|---------------------------------------|----------------------|
| 1. Nondestructive testing (NDT) | 9. Image processing |
| 2. Industry 4 | 10. Machine Learning |
| 3. Hannovermesse | 11. Deep Learning |
| 4. Internet of things (IoT) | 12. Machine vision |
| 5. Artificial intelligence (AI) | |
| 6. Big Data | |
| 7. 5G | |
| 8. Convolutional neural network (CNN) | |

مراجع

- [1] M.Topp, and L. Strothmann, "How can NDT 4.0 improve the Probability of Detection (POD)", The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934, 2020
- [2] J. Vrana, and R. Singh, "NDE 4.0 - From Design Thinking to Strategy", DOI: 10.1007/s10921-020-00735-9, 2020
- [3] J. Vrana, N. Meyendorf, N. Ida, and R. Singh, "Introduction to NDE 4", DOI: 10.1007/978-3-030-48200-8_43-2, 2020
- [4] Adil EL HARRAK, Mohamed RHAZZAF, Member, IAENG, and Imane MOUMENE, "Deep learning approach for non-destructive radiographic testing of piping welds", 2024
- [5] Abdulmalik Mohammed AlShareef, Majdi Alnowaimi, and Mohammed Siddig, "Detection of welding crack defects based on CNN in non-destructive radiographic testing", 2024
- [6] Lakhani, Paras, and Baskaran Sundaram, "Deep learning at chest radiography": automated classification of pulmonary tuberculosis by using convolutional neural networks." Radiology 284.2, 2017.

نویسندگان

فریده باتقوا^{۱*}حمید حیدری^۲

۱. کارشناس آزمایشگاه تحقیقاتی اکسیر تجهیز آزما
 ۲. عضو کارگروه کروماتوگرافی

*exirtajhizazma@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

کاربرد فیلتراسیون در آماده‌سازی نمونه‌ها در کروماتوگرافی

(بخش اول)



واژه‌های کلیدی

فیلتر، فیلتر غشایی، فیلتر ممبران، کروماتوگرافی، آماده‌سازی نمونه، فیلتر سرسرنگی.

چکیده

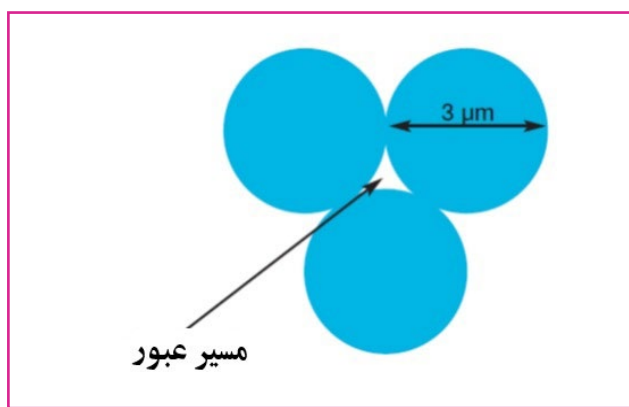
آماده‌سازی نمونه‌ها برای کروماتوگرافی یک فرآیند چند مرحله‌ای است که نیازمند دقت و استفاده از تجهیزات مناسب است. استفاده از فیلترهای با کیفیت و مناسب برای هر نمونه و ستون و تنظیم دقیق مراحل آماده‌سازی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر دقت و صحت نتایج داشته باشد. آماده‌سازی نمونه‌ها برای دستگاه‌های کروماتوگرافی فرآیندی پیچیده و دقیق بوده که شامل مراحل مختلفی از استخراج نمونه تا تزریق نمونه به دستگاه است. در این مقاله، به اهمیت استفاده از فیلتر قبل از تزریق نمونه به دستگاه و قبل از عبور حلال به‌عنوان فاز متحرک و انواع مختلف آنها و کاربرد هر یک به تفکیک می‌پردازیم.

به‌طور کلی، یکی از روش‌هایی که برای خالص‌سازی مواد و محلول‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود، فیلتراسیون است. در این فرآیند، از یک فیلتر یا غشا استفاده می‌شود که با عبور کردن محلول از آن، بخشی از ناخالصی‌ها در غشا مانده و امکان عبور از غشا را نخواهند داشت؛ در نتیجه، پس از عبور از غشا، بخشی از ناخالصی‌های محلول حذف خواهد شد. انواع مختلفی از غشا با توجه به کاربرد آنها وجود دارد که از جمله می‌توان به فیلترهای غشایی و فیلترهای سرسرنگی اشاره کرد. در بخش اول این مقاله، فیلترهای غشایی و کاربرد آنها در آنالیزهای کروماتوگرافی معرفی می‌شوند. تاثیر اندازه ذرات پر شده ستون‌های کروماتوگرافی مایع به‌عنوان فاز متحرک در انتخاب اندازه منافذ فیلترهای غشایی بررسی شده و نکاتی که در انتخاب فیلتر از نظر خواص و کاربرد اهمیت دارد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، انواع پر کاربرد فیلترهای غشایی مقایسه می‌شوند و در بخش دوم نیز فیلترهای سرسرنگی معرفی خواهند شد.

مقدمه

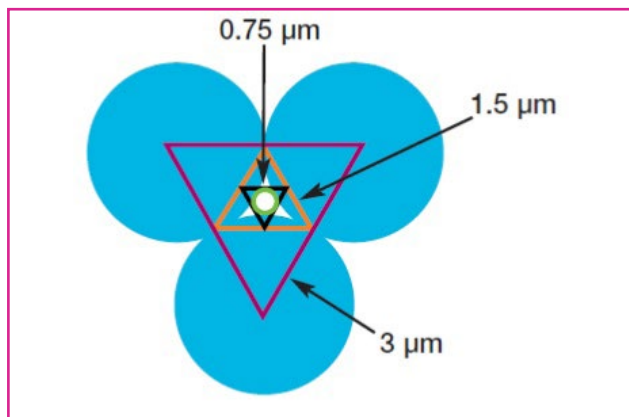
چگونگی انتخاب فیلتر برای فاز متحرک در کروماتوگرافی مایع

مطلوب است که عمر ستون کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^۳ را افزایش داده و تعمیر و نگهداری به دلیل وجود ذرات در سیستم پمپاژ کاهش یابد. با توجه به این فرض، اندازه منافذ فیلتر باید براساس اندازه ذرات پر شده ستون تعیین شود. همان طور که در شکل (۱) می‌بینید، ذرات پر شده ستون با یکدیگر تماس دارند. در حالت ایده‌آل، نباید آلودگی در فضای بین ذرات پر شده قرار گیرد. این فضا با نام مسیر عبور^۴ در شکل (۱) مشخص شده است.



شکل (۱): چگونگی قرارگیری ذرات پر شده در ستون کروماتوگرافی [۱].

هدف این است که مشخص شود فضای مسیر عبور چقدر بزرگ است تا بتوان ذرات با آن اندازه را حذف کرد. به عنوان مثال، اگر اندازه ذرات پر شده را ۳ میکرومتر در نظر بگیریم، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، چند مثلث متساوی‌الاضلاع به خوبی در آن قرار می‌گیرد. بزرگ‌ترین ذره‌ای که می‌تواند در ستون قرار گیرد، با ترسیم مثلث متساوی‌الاضلاع با طول ضلع ۰/۷۵ میکرومتر تعیین می‌شود.



شکل (۲): ترسیم مثلث متساوی‌الاضلاع در مسیر عبور ذرات پر شده در ستون کروماتوگرافی [۱].

معرفی

غشاء لایه نازکی از مواد نیمه تراوا است که وقتی نیروی محرکه روی غشا اعمال می‌شود، مواد را جدا می‌کند. فرآیندهای غشایی به‌طور فزاینده‌ای برای حذف باکتری‌ها، میکروارگانیسم‌ها، ذرات و مواد آلی طبیعی استفاده می‌شوند. فیلتر غشایی یا فیلتر ممبران نوعی فیلتر ساخته شده از مواد مصنوعی مانند استات سلولز، نایلون یا تفلون است که با کانال‌های به هم پیوسته ظریف یا منافذ استوانه‌ای یکنواخت برای بهبود نرخ جریان برای فرآیندهای فیلتراسیون در شیمی طراحی شده است. در واقع، فیلتراسیون غشایی فرآیندی است که از یک مانع انتخابی به نام غشاء استفاده می‌کند تا مولکول‌های زیستی و ذرات را براساس اندازه آنها جدا کند و به مولکول‌های کوچک‌تر اجازه عبور دهد و در عین حال مولکول‌های بزرگ‌تر را حفظ کند.

کاربرد فیلتر غشایی یا ممبران فیلتر در کروماتوگرافی چیست؟

غشاها با فشار به‌عنوان فرآیندهای محرک در فیلتراسیون غشایی املاح و در اسمز معکوس استفاده می‌شوند. فیلتر غشایی در کروماتوگرافی به‌عنوان ابزاری برای جداسازی و خالص‌سازی نمونه‌ها استفاده می‌شود. این فیلترها به‌طور معمول برای حذف ذرات معلق، باکتری‌ها و ناخالصی‌های موجود در مایعات قبل از ورود به سیستم کروماتوگرافی به کار می‌روند. استفاده از فیلتر غشایی به بهبود دقت و صحت نتایج آزمایش کمک می‌کند.

عملکرد فیلترهای غشایی در سیستم کروماتوگرافی چگونه است؟

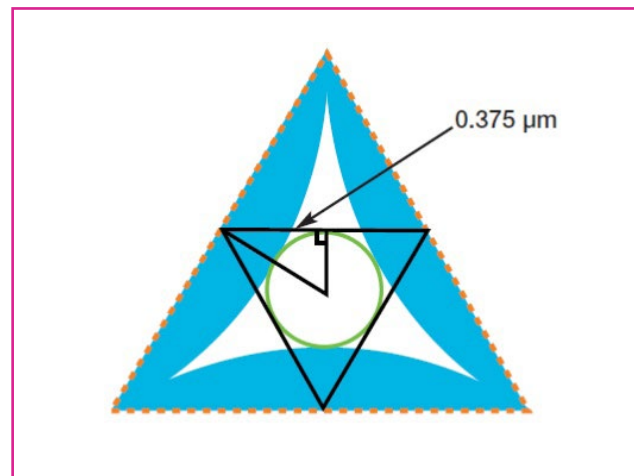
فیلتر غشایی که به‌عنوان فیلتر میکرو متخلخل^۱ یا فیلتر غربالی^۲ نیز شناخته می‌شود، نوعی فیلتر است که در کاربردهای مختلف علمی، صنعتی و زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی آن، جداسازی ذرات و میکروارگانیسم‌ها از نمونه مایع و یا گاز براساس اندازه آنها است. اندازه منافذ فیلترها بسته به نوع فیلتر و نیاز آزمایش می‌تواند متفاوت باشد. انتخاب اندازه مناسب منافذ برای حذف مؤثر ناخالصی‌ها و حفظ کیفیت نمونه بسیار مهم است [۱].

چه نوع فیلتر غشایی در کروماتوگرافی مایع و کروماتوگرافی گازی^۶ استفاده می‌شود؟

فیلترهای غشایی به‌طور معمول قبل از تزریق نمونه به سیستم‌های HPLC و GC استفاده می‌شوند تا از ورود ناخالصی‌ها به سیستم جلوگیری کنند و دقت نتایج را افزایش دهند. استفاده از فیلترهای غشایی در مراحل آماده‌سازی نمونه، به ویژه در روش‌های آنالیزی مانند کروماتوگرافی، بسیار حائز اهمیت است و به بهبود کیفیت و دقت نتایج آزمایش‌ها کمک می‌کند.

فیلترهای غشایی در جداسازی زیستی در همه جا وجود دارند و به‌طور عمده برای جداسازی تقریبی مولکول‌ها براساس تفاوت در اندازه استفاده می‌شوند. با این حال، میل ترکیبی، تبادل یونی، برهم‌کنش آبریز یا لیگندهای فاز معکوس ممکن است به چنین غشاهایی «فیلترهای میل ترکیبی» جفت شوند تا گزینش‌پذیری آنها را برای مولکول هدف با چندین مرتبه بزرگی افزایش دهند. برای چنین اهدافی از مواد غشایی مختلف از جمله پلی‌آمید، سلولز احیا شده، پلی‌استایرن و کopolymerهای مختلف استفاده شده‌است. یکی دیگر از مزیت‌های فیلترهای غشایی، مقاومت جریان کم آنها (فشار برگشتی) است. از آنجایی که کارایی جداسازی (ارتفاع صفحه) هیچ وابستگی به نرخ جریان نشان نمی‌دهد، جداسازی‌ها را می‌توان در عرض چند ثانیه با نرخ جریان بسیار بالا انجام داد، مگر اینکه سینتیک جذب در آنها محدودیتی ایجاد کند. کروماتوگرافی غشایی بیشتر با استفاده از دستگاه‌های مشتق شده از واحدهای فیلتراسیون معمولی انجام می‌شود، اگرچه برخی از نگهدارنده‌های فیلتر وجود دارند که با سیستم‌های کروماتوگرافی معمولی یا آنالیزهای تزریق جریان سازگار هستند [۲].

در صورتی که نمودار را بزرگ کرده و بهتر نگاه کنیم مجموعه‌ای از مثلث‌های متساوی‌الاضلاع را می‌توان تصور کرد که طول ضلع آنها به ۰/۷۵ میکرومتر می‌رسد. شکل (۳) یک مثلث قائم‌الزاویه را نشان می‌دهد که ضلع کوتاه آن شعاع کره را نشان می‌دهد. زاویه یک نیمه ۶۰ درجه یا ۳۰ درجه است. ضلع افقی این مثلث قائم‌الزاویه جدید ۰/۳۷۵ میکرومتر (نصف ۰/۷۵ میکرومتر) طول دارد. با محاسبه مماس ۳۰ درجه، نسبت طول ضلع مقابل به ضلع مجاور، در این مورد ۰/۵۸ است. این بدان معنی است که ضلع کوتاه مثلث برابر با ۰/۵۸، یا همان 0.375×0.75 میکرومتر بوده که بر حسب اتفاق این هم شعاع ذره است. بنابراین، اگر قطر ذرات پر شده ستون ۳ میکرومتر باشد، مسیر جریان ۰/۴۳ میکرومتر است.



شکل (۳): ترسیم مثلث قائم‌الزاویه در مسیر عبور ذرات پر شده در ستون کروماتوگرافی [۱].

چگونه فیلتر مناسب برای هدف خود در آزمایشگاه انتخاب کنیم؟

هنگام انتخاب بهترین فیلتر برای برنامه خود، باید به سه نکته اصلی توجه شود:

۱. سازگاری شیمیایی فیلتر چیست؟ آیا فیلتر باید در برابر بازها، اسیدها یا حلال‌های آلی مقاوم باشد؟ هنگام انتخاب فیلتر برای آماده‌سازی نمونه یا فاز متحرک، سازگاری شیمیایی یک نکته مهم است.
 ۲. فیلتر با چه مساحتی برای فیلتراسیون مورد نیاز است؟
 ۳. اندازه منافذ بهینه برای فیلتر کردن نمونه چقدر است؟
- بر این اساس، دسته‌بندی انواع فیلترهای غشایی پلیمری در جدول (۱) ذکر شده‌است:

بنابراین، هنگامی که ستون HPLC با اندازه ذرات پر شده ۳ میکرومتر یا کوچکتر باشد، باید از یک فیلتر ۰/۲ میکرومتر استفاده شود زیرا یک فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر ممکن است ذرات را از خود عبور دهد و ستون را مسدود کند. برای سیستم‌های کروماتوگرافی مایع با استفاده از ستون‌هایی با ذرات پر شده بزرگتر از ۳ میکرومتر، استاندارد غشای فیلتراسیون ۰/۴۵ میکرومتر برای فیلترهای غشایی فاز متحرک است. برای ستون‌هایی با ذرات پر شده ۳ میکرومتر یا کوچک‌تر، از جمله دستگاه‌های کروماتوگرافی مایع با عملکرد فوق‌العاده بالا، ستون‌های ریز منفذ، یا زمانی که نگرانی بابت رشد میکروبی وجود داشته باشد، فیلتر ۰/۲ میکرومتری توصیه می‌شود.

جدول (۱): دسته‌بندی انواع فیلترهای غشایی پلیمری [۲].

| کاربرد | خواص | ماهیت فیلتر غشایی | |
|---|---|-------------------|--|
| برای فیلتراسیون همه نمونه‌های آبی و بیشتر حلال‌ها (آلی) | آب‌گریز مقاومت خوب در برابر حلال‌ها چسبندگی پروتئین متوسط | Nylon | نایلون |
| برای فیلتراسیون محیط‌های غیر آبی و حلال‌ها (آلی) مناسب برای فیلتر کردن و گاززدایی در کروماتوگرافی | آب‌گریز بالاترین مقاومت در برابر حلال‌ها چسبندگی پروتئین بالا | Teflon | تفلون |
| برای فیلتراسیون تمام محیط‌های آبی و بیشتر حلال‌ها (آلی) فیلتراسیون عمومی نمونه‌های زیستی (هیدروفیل) | آبدوست مقاومت بالا در برابر حلال‌ها چسبندگی پروتئین بالا ویژگی‌های سرعت جریان ^۷ خوب | PVDF-HF | پلی وینیلیدین فلوراید آبدوست (هیدروفیل) |
| برای فیلتراسیون تمام محیط‌های آبی و بیشتر حلال‌ها (آلی) فیلتراسیون عمومی نمونه‌های زیستی | آب‌گریز مقاومت بالا در برابر حلال‌ها چسبندگی پروتئین بالا ویژگی‌های سرعت جریان خوب | PVDF-HB | پلی وینیلیدین فلوراید آبگریز (هیدروفوب) |
| ایده‌آل برای نمونه‌های آبی ایده‌آل برای کشت بافت و نمونه‌های زیستی حساس | آبدوست مقاومت محدود در برابر حلال‌ها پایین‌ترین چسبندگی پروتئین | CA | سلولز استات |
| ایده‌آل برای نمونه‌های آبی به‌خصوص برای فیلتراسیون اثر آلودگی (عدم خلوص) پروتئینی | آبدوست مقاومت زیاد در برابر حلال‌ها پایین‌ترین چسبندگی پروتئین | RC | سلولز احیا شده |
| فیلتراسیون تمام محیط‌های آبی و بیشتر حلال‌ها (آلی) فیلتراسیون عمومی نمونه‌های زیستی | آب‌گریز است مقاومت بالا در برابر حلال‌ها در مقایسه با PVDF چسبندگی پروتئین پایین‌تر | PP | پلی پروپیلن |
| ایده‌آل برای نمونه‌های آبی ایده‌آل برای کشت بافت و نمونه‌های زیستی حساس | آب دوست مقاومت محدود در برابر حلال‌ها چسبندگی پروتئین پایین ویژگی‌های سرعت جریان خوب | PES | پلی اتر سولفون |
| فیلتراسیون عمومی نمونه‌های زیستی کاربرد متنوع برای پاک کردن نمونه‌ها و پیش فیلتر کردن | به‌عنوان پیش فیلتر برای برطرف کردن ذرات درشت و کاهش هدر رفتن نمونه | GMF | میکروفیبر شیشه‌ای |

نکات تکمیلی برای انتخاب فیلتر مناسب

فیلترهای با غشای پلی تترا فلورو اتیلن^{۱۰} را انتخاب نمود.

◆ محلول‌های حلال آبی و آلی

غشاهای پلیمری مختلف سازگاری شیمیایی متفاوتی دارند. براساس کاربرد و سازگاری شیمیایی، می‌توان یک یا چند نوع فیلتر غشایی یا سرسرنگی را انتخاب نمود. به‌طور کلی، یک نوع فیلتر به دلیل محدودیت در آب‌گریزی/آب دوستی و سازگاری شیمیایی برای همه کاربردها عمل نمی‌کند. با این حال، غشای پلی پروپیلن آبدوست یک غشای عمومی برای کاربردهای آبی و آلی است.

◆ سطوح فوق‌العاده پایین قابل استخراج

فیلترها برای افزایش دقت با حذف ذرات ناخواسته

◆ نمونه‌های آبی

غشاهای آبدوست یا هیدروفیل که میل ترکیبی با آب دارند هنگام فیلتر کردن نمونه‌های آبی ترجیح داده می‌شوند. از فیلترهای با غشاهای پلی وینیلیدین فلوراید^۸، نایلون یا پلی اتر سولفون^۹ می‌توان استفاده کرد.

◆ گازها و حلال‌های آلی خورنده

غشاهای آبگریز یا هیدروفوب آب را دفع می‌کنند و نسبت به حلال‌های آلی خورنده بی‌اثر هستند و آنها را برای گازها و حلال‌های آلی، ایده‌آل می‌کند. در این حالت می‌توان

نتیجه‌گیری

فیلتراسیون غشایی فرآیندی است که از یک مانع انتخابی به نام غشاء استفاده می‌کند تا مولکول‌های زیستی و ذرات را براساس اندازه آنها جدا کند و به مولکول‌های کوچک‌تر اجازه عبور دهد و در عین حال مولکول‌های بزرگ‌تر را حفظ کند. در این مقاله به معرفی فیلترهای غشایی و کاربرد آنها در آنالیزهای کروماتوگرافی پرداخته شد. تاثیر اندازه ذرات پرشده ستون‌های کروماتوگرافی مایع به‌عنوان فاز متحرک در انتخاب اندازه منافذ فیلترهای غشایی مورد بررسی قرار گرفت. نکاتی که در انتخاب فیلتر از نظر خواص و کاربرد اهمیت دارد دسته‌بندی شد و انواع پر کاربرد آنها مورد مقایسه قرار گرفت.

طراحی شده‌اند. با این حال، فیلتر نامناسب می‌تواند منبع آلاینده‌هایی به شکل مواد قابل استخراج باشد که از دستگاه فیلتر به نمونه شسته می‌شود. این مصنوعات نامطلوب می‌توانند نتایج آنالیز را به خطر بیندازند. برخی از نگرانی‌های قابل استخراج عبارتند از شویش ترکیبی^[۱]، خطا در مقادیر اندازه‌گیری شده و پیک‌های مزاحم.

تفاوت بین فیلتر غشایی یا ممبران فیلتر PES و PVDF چیست؟

به‌طور خلاصه، غشاهای PES برای کاربردهای زیستی مبتنی بر آبی که نیاز به اتصال کم پروتئین دارند، ایده‌آل هستند، در حالی که غشاهای PVDF متنوع‌تر و از نظر شیمیایی قوی‌تر هستند و آنها را برای کاربردهایی با حلال‌های آلی یا نیاز به حفظ پروتئین بالا مناسب‌تر می‌سازد [۳].

پی‌نوشت

1. microporous filter
2. sieve filter
3. High Performance Liquid Chromatography (HPLC)
4. Flow path
5. Ultra-High Performance Liquid Chromatography (UHPLC)
6. Gas chromatography (GC)
7. Flow rate
8. Polyvinylidene fluoride or polyvinylidene difluoride (PVDF)
9. Polyethersulfone (PES)
10. Polytetrafluoroethylene (PTFE)
11. coelution

مراجع

- [1] HPLC and Chromatography Sample Prep. 1.800.521.1520 (USA and Canada), www.pall.com/lab.
- [2] Sample preparation on filtration, Element lab solutions. Element.com.
- [3] Chromatography: basic principles. Sample preparations and related methods. E Lundanes, L Reubsæet, T Greibrokk - 2013 - books.google.com

نویسندگان

شیلا صفائی‌ان، مهدیه شکوهی*^۲
بهناز محمودی^۲

۱. مدیر عامل شرکت دانش‌بنیان آریا سلامت رازی
۲. آزمایشگاه آریا سلامت رازی

*asrazma@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

واژه‌های کلیدی

جذب اتمی کوره گرافیت، هضم، برنج، سرب، آرسنیک و کادمیوم.

مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک در تعیین فلزات سنگین سرب و کادمیوم به روش جذب اتمی کوره گرافیت در برنج

چکیده

فلزات سنگین جزء گروه آلاینده‌های پایدار به شمار می‌روند و ورود آنها به زنجیره مواد غذایی از طریق محصولات غذایی می‌تواند آسیب جدی بر سلامت افراد مصرف کننده ایجاد نماید. یکی از روش‌های رایج در تعیین سطح فلزات سنگین، استفاده از روش طیف‌سنجی جذب اتمی کوره گرافیت^۱ بوده که آماده‌سازی در این روش، گامی مهم و بحرانی در تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد و دقیق است. از آنجایی که روش هضم در مرحله آماده‌سازی وابسته به ماتریکس نمونه بوده و در روش‌های بدون برای هر یک از ماتریکس‌ها روش جداگانه و استاندارد ویژه‌ای ذکر نشده‌است، هدف از انجام این مطالعه مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک در بررسی فلزات سنگین محصول برنج با استفاده از روش طیف‌سنجی جذب اتمی کوره گرافیت است. سایر اهداف این مقاله شامل تعیین سطوح آلاینده‌های سرب و کادمیوم در برنج است.

نتایج مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک به روش (GFAAS) در نمونه‌های برنج نشان می‌دهد که میانگین غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در روش هضم اسیدی بیشتر از روش هضم خشک است.

به‌صورت کلی، درصد بازیابی تعیین سرب و کادمیوم به روش اسیدی به ترتیب ۱۰۳ و ۹۹/۷ درصد و بازیابی روش هضم خشک ۱۱۰ و ۹۹/۵ درصد است ولی نتایج آزمون تی^۲ بین دو روش هضم خشک و هضم اسیدی اختلاف معناداری نشان نمی‌دهد.

برنج پس از گندم یکی از پر مصرف ترین انواع غلات در سطح جهان به ویژه کشورهای آسیایی به شمار می‌رود و به‌طور نسبی ۷۰ درصد از کالری مورد نیاز روزانه افراد را تأمین می‌کند [۱]. بررسی‌های سازمان بهداشت جهانی نشان داده است که در سال‌های اخیر، استفاده از برنج در سرتاسر جهان افزایش یافته است. با گسترش محبوبیت و تجارت برنج، امنیت، سلامت و کیفیت برنج و محصولات فرآوری شده آن به نگرانی عمده سازمان‌های جهانی تبدیل شده است [۲]. در کشور ایران نیز این محصول به‌عنوان دومین ماده غذایی پر مصرف به شمار می‌آید [۳]. در تجارت مواد غذایی، بهداشت و سلامت فرآورده‌های غذایی دارای اهمیت بسیاری است و از نظر آلودگی به انواع آلاینده‌ها باید مورد ارزیابی قرار گیرد. تخلیه فاضلاب‌های شیمیایی در محیط زیست و استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی به‌منظور اصلاح ویژگی‌های خاک می‌تواند سبب افزایش آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین شود [۴]. در بین فلزات سنگین، سرب و کادمیوم از جمله فلزات سمی و از مهم‌ترین آلاینده‌های محیطی در طبیعت به شمار می‌روند [۵]. فلزات سنگین، تجزیه زیستی ندارند و حضورشان در مواد غذایی بیش از حد استاندارد منجر به بروز انواع بیماری‌ها از جمله اختلالات عصبی، سرطان و اختلالات ژنتیکی می‌شود [۶]. فلز سنگین سرب در حد گسترده‌ای در محیط زیست و مواد غذایی وجود دارد و آسیب‌های زیادی روی سیستم عصبی، کلیه، شش، مغز استخوان و خون ایجاد می‌کند. اختلال سنتز زیستی هموگلوبین و کم خونی، افزایش فشار خون، آسیب به کلیه‌ها، سقط جنین و نوزاد نارس، اختلال در سیستم عصبی، آسیب به مغز، ناباروری مردان، کاهش قدرت یادگیری از عوارض منفی افزایش غلظت سرب در بدن است [۷]. فلز سنگین کادمیوم از جمله فلزاتی است که به‌طور وسیع در محیط زیست پراکنده شده است؛ منبع اصلی این فلز ترکیبات صنعتی و کودهای فسفاته بوده که به سهولت توسط گیاهان جذب می‌شود و از خاصیت سمیت بالایی برخوردار است. این فلز در بافت‌هایی مانند کبد و کلیه تجمع نموده و باعث بروز کم خونی، افزایش فشار خون و ایجاد تومور سرطانی به ویژه در شش‌ها و پروستات می‌کند [۶].

یکی از چالش‌های مهم در تعیین سطح فلزات سنگین، مرحله هضم است. مرحله هضم یکی از مراحل بسیار مهم و حیاتی در فرآیند آماده‌سازی نمونه برای آنالیز با دستگاه جذب اتمی کوره گرافیتی است. این مرحله به‌منظور تبدیل نمونه جامد یا پیچیده به محلولی همگن و قابل آنالیز انجام می‌شود. با توجه به این که ماتریکس هر ماده غذایی متفاوت است و درصدهای متفاوتی از چربی و پروتئین در فرآیند هضم دخالت دارند، استاندارد به‌صورت جداگانه برای هضم فلزات سنگین مواد غذایی گوناگون شرح داده نشده است و همین امر موجب اختلاف در نتایج به‌دست آمده از آزمون فلزات سنگین می‌شود. روش‌های مختلفی برای هضم نمونه‌ها وجود دارد که انتخاب روش مناسب به نوع نمونه، ماتریکس نمونه و عنصر مورد آنالیز بستگی دارد. برخی از روش‌های رایج عبارتند از:

- ▶ **هضم با اسیدهای قوی:** مانند اسید نیتریک، اسید سولفوریک و اسید پرکلریک؛
- ▶ **هضم با مخلوط اسیدها:** ترکیبی از چند اسید برای هضم نمونه‌های پیچیده؛
- ▶ **هضم با ماکروویو:** روشی سریع و کارآمد برای هضم نمونه‌ها؛
- ▶ **هضم خشک:** برای هضم نمونه‌های آلی [۸].

به دلیل اهمیت روش هضم در آنالیز با دستگاه جذب اتمی کوره گرافیتی، در این پژوهش به مقایسه دو روش هضم اسیدی و هضم خشک در برنج پرداخته شده است. مطالعاتی که در سال‌های اخیر در زمینه آلودگی مواد غذایی با فلزات سنگین به ویژه در مورد برنج انجام شده، نشان‌دهنده چالش‌های جدی در زمینه فلزات سنگین است. بنابراین، این پژوهش به بررسی میزان (فلزات سنگین سرب و کادمیوم) در انواع برنج براساس استاندارد ملی پرداخته است.

نتایج به‌دست آمده از غلظت سرب در برنج در سطح عرضه توسط نورتون و همکاران نشان می‌دهد که بیشترین غلظت سرب مربوط به کشور چین بوده و بقیه کشورها به ترتیب عبارتند از: نپال، گانا، هند، سری لانکا، فرانسه، پاکستان، آمریکا، تایلند، ایتالیا و یتنام و در نهایت کمترین غلظت سرب مربوط به کشور ژاپن است [۹].

نتایج حاصل از مطالعه جعفری مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مطالعه برنج هندی از سه برند پر مصرف بازار نشان داد که میانگین میزان سرب و کادمیوم به ترتیب در ۲۷/۵ درصد و ۴۲/۳ درصد از نمونه‌ها بیش از حد مجاز ۱۵۰ ppb و ۶۰ ppb است [۱۰]. نتایج به‌دست آمده از پژوهش انجام شده توسط جاهد خانیکی و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان داد که میزان سرب و کادمیوم در گونه برنج اورزیا ساتیوا^۳ در ۶ نقطه از استان مازندران (به‌طور مشخص در قائم‌شهر) به ترتیب در محدوده مجاز ۰/۱۷ ± ۰/۴۱ ppm و ۲/۲۳ ± ۰/۱۸ ppm در کادمیوم قرار داشت [۱۱].

افشار و همکاران در سال ۱۹۹۵ نشان دادند که غلظت کادمیوم در برنج آمل به‌صورت میانگین حدود ۹۰ ppb بوده است [۱۲]. بنابراین، در این پژوهش قصد داریم دو روش هضم اسیدی و خشک برای آماده‌سازی نمونه برنج به‌منظور آزمون فلزات سرب و کادمیوم با دستگاه جذب اتمی بررسی نماییم.

○ مواد و روش‌ها

احتمالی، با اسید شسته و با آب دیونیزه آبکشی و در آون خشک شدند.

○ مشخصات و روش کار با دستگاه جذب اتمی

دستگاه جذب اتمی مورد استفاده قرار گرفت و برنامه مربوط به عنصر مورد نظر از بین برنامه‌های موجود انتخاب و شرایط دستگاه برای هر یک از عناصر تنظیم شد.

به‌منظور تهیه نمونه‌های مادر و استانداردهای کاری سرب با غلظت‌های (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و همچنین برای تهیه نمونه‌های مادر و استانداردهای کاری کادمیوم با غلظت‌های (۱، ۲ و ۳) از غلظت‌های توصیه شده در دستورالعمل دستگاه استفاده شد. اندازه‌گیری سرب در طول موج ۲۸۳/۳ nm، در حضور لامپ دوتریوم انجام شده است و حجم تزریق استانداردها و نمونه ۲۰ میکرولیتر طبق دستورالعمل دستگاه انجام شد. اندازه‌گیری کادمیوم در طول موج ۲۲۸/۸ nm در حضور لامپ دوتریوم انجام شده است و حجم تزریق استانداردها و نمونه ۲۰ میکرولیتر طبق دستورالعمل دستگاه انجام شد. پس از خواندن استانداردها، منحنی کالیبراسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که ضریب همبستگی در حدود قابل قبول باشد تزریق نمونه‌ها انجام می‌شود. خلاصه اطلاعات مربوط به بخش‌های تنظیمی دستگاه در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول (۱): بخش‌های تنظیمی دستگاه.

| بخش‌های تنظیمی | سرب | کادمیوم |
|----------------|----------|----------|
| طول موج | ۲۸۳/۳ nm | ۲۲۸/۸ nm |
| شدت جریان لامپ | ۳ MA | ۳ MA |
| حجم نمونه | ۲۰ μl | ۱۰ μl |
| گاز | آرگون | آرگون |

○ صحنه‌گذاری

به‌منظور صحنه‌گذاری روش آزمون، از روش اسپایک مواد مرجع تایید شده به‌منظور تعیین درصد بازیابی استفاده شد. همچنین برای راستی آزمایی نتایج حاصل از دستگاه کوره

به‌منظور بررسی و مقایسه میزان عناصر فلزات سنگین سرب و کادمیوم در نمونه برنج، ۴۵ نمونه برنج از سطح عرضه بازار در سال ۱۴۰۱ به‌صورت تصادفی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد.

○ روش هضم سرب و کادمیوم به روش اسیدی

به‌منظور ارزیابی و مقایسه دو روش هضم در سنجش فلزات سنگین در نمونه برنج، ابتدا نمونه برنج از سطح عرضه تهیه شد. سپس از برنج مورد نظر، مقدار تقریبی ۲۰ گرم نمونه در ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون و سپس داخل دسیکاتور قرار داده شد. این عمل چندین بار تکرار می‌شود تا نمونه برنج به وزن ثابت برسد. سپس نمونه برنج آماده شده به داخل هم‌زن منتقل می‌شود تا به‌طور کامل همگن شود. از نمونه مخلوط شده ۵ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و به ظرف مخصوص شیشه‌ای دستگاه هضم ماکروویو منتقل شد. سپس به آن ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک اضافه و به مدت یک ساعت در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود تا حجم آن به یک میلی‌لیتر برسد. محتویات هضم شده به بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری انتقال یافت و با اسید نیتریک ۶ نرمال به حجم رسانده شد [۸].

○ روش هضم سرب و کادمیوم به روش خشک

ابتدا از نمونه برنج تهیه شده از سطح عرضه، مقدار تقریبی ۲۰ گرم وزن و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا خشک شود و سپس داخل دسیکاتور^۴ قرار داده شد. این عمل چندین بار تکرار می‌شود تا نمونه برنج به وزن ثابت برسد. سپس نمونه برنج آماده شده، داخل هم‌زن به‌طور کامل همگن شد. از نمونه مخلوط شده ۵ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و در بوتله چینی قرار گرفت و درب آن بسته شد تا با حرارت دادن، خاکستر شود. سپس در کوره ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از گذشت ۵ ساعت تبدیل به خاکستر شد. سپس با استفاده از اسید نیتریک ۶ نرمال در بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری به حجم رسانده شد [۱۳].

○ روش آماده‌سازی

تمامی ظروف آزمایشگاهی به‌منظور رفع آلودگی

مقدار ماده‌ای گفته می‌شود که آنالیت از صفر یا بلانک قابل تشخیص باشد. تمایز بین حد تشخیص دستگاه و حد تشخیص آزمون ضروری است. حد تشخیص دستگاه می‌تواند براساس واکنشگر بلانکی که به‌طور مستقیم به دستگاه معرفی می‌شود، تعیین شود.

برای تعیین حد تشخیص، ۱۰ بار نمونه بلانک به دستگاه تزریق و میانگین گرفته می‌شود، سپس انحراف استاندارد (S_0) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۲)، S_0 محاسبه می‌شود. حد تشخیص (LOD) با استفاده از رابطه (۳) و حد تعیین کمی شدن (LOQ) با رابطه (۴) محاسبه شد.

$$S'_0 = \sqrt{2} \times S_0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$LOD = \frac{3 \times S'_0}{B1} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$LOQ = \frac{10 \times S'_0}{B1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

روش آماری

نتایج حاصل از غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم فلزات براساس قرائت دستگاه و وزن نمونه تعیین و تجزیه و تحلیل داده‌های استخراج شده از آزمایش‌ها با استفاده نرم‌افزار اسپیکس^۷ انجام و تفاوت میان تیمارها با یکدیگر و گروه‌ها توسط آزمون آماری دانکن در سطح ۰/۰۵ آنالیز واریانس یک طرفه^۸ ارزیابی شد.

حدود مجاز

حدود مجاز فلزات سنگین مورد سنجش طبق استاندارد ملی ۱۲۹۶۸، برای سرب ۱۵۰ ppb و برای کادمیوم ۶۰ ppb است.

نتایج

برای مقایسه دو روش هضم اسیدی و خشک با یکدیگر، نتایج به‌دست آمده از ماتریکس برنج به روش هضم اسیدی و خشک با ۵ تکرار در جدول (۳) خلاصه شده‌است. نتایج آزمون تی بین روش هضم کوره و هضم اسیدی نشان می‌دهد که نتایج دو روش، اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. با توجه به اینکه روش هضم اسیدی از دقت بالاتری نسبت به

جذب اتمی گرافیتی، حد تشخیص^۵ و حد کمی شدن^۶ و میزان خطی بودن منحنی‌های کالیبراسیون به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. تصدیق و صحت‌گذاری روش‌های آزمون براساس ایزو ۱۵۱۸۹ انجام شده‌است.

تعیین درصد بازیابی سرب و کادمیوم

برای به‌دست آوردن درصد بازیابی، براساس روش استاندارد ISIRI 9266، سطوح مختلف از آنالیت‌ها قبل از عمل هضم اسیدی و هضم خشک به‌صورت جداگانه روی ماتریکس نمونه اسپیک شدند. سطوح انتخابی بازیابی براساس آلودگی فلزات سنگین نمونه اولیه انتخاب شد که شامل سطح پایین ۱۰ ppb به ازای هر گرم نمونه برای آزمون بازیابی سرب و سطح متوسط ۵۰ ppb به ازای هر گرم نمونه برای آزمون بازیابی کادمیوم است. درنهایت، به روش آماری آزمون تی مورد ارزیابی قرار گرفت.

درصد بازیابی: درصد بازیابی از رابطه (۱) به‌دست آمد و با توجه به محدوده غلظت ppb که در جدول (۲) آمده است، درصد بازیابی قابل قبول مشخص شده‌است.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{درصد بازیابی} = \frac{\text{میزان بدست آمده}}{\text{میزان قابل انتظار}} \times 100$$

جدول (۲): محدوده غلظت و درصد بازیابی [۸].

| محدوده غلظت ppb | درصد بازیابی قابل قبول |
|-----------------|------------------------|
| کمتر از ۱ | ۵۰-۱۲۰ |
| بین ۱-۱۰ | ۶۰-۱۲۰ |
| بیشتر از ۱۰ | ۶۰-۱۴۰ |

به‌دست آوردن حد تشخیص و حد کمی شدن

براساس الزامات ۱۷۰۲۵ و ایزو ۱۵۱۸۹ یکی از ویژگی‌های عملکردی روش‌ها هنگام تصدیق یا صحت‌گذاری، روش آزمون تعیین حد تشخیص (LOD) و حد تعیین کمی شدن (LOQ) است.

حد تشخیص و یا حد پایین تشخیص (LOD) به کمترین

جدول (۳): نتایج حاصل از قرائت دستگاه.

| روش مورد استفاده | وزن نمونه | میانگین غلظت فلز قبل از اسپیک | مقدار اسپیک | تکرار اول بعد از اسپیک | تکرار دوم بعد از اسپیک | تکرار سوم بعد از اسپیک | تکرار چهارم بعد از اسپیک | تکرار پنجم بعد از اسپیک | میانگین | انحراف معیار | درصد بازیابی |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|--------------|--------------|
| بازیابی روش هضم اسیدی سرب | گرم 0.15 ± 0.02 | ۴۰/۶۸ | ۱۰ ppb | ۳۰ ppb | ۶۰ ppb | ۴۲ ppb | ۷۲ ppb | ۵۷ ppb | ۵۲/۲ ppb | ۷/۳۲ ppb | ۱۰۳ |
| بازیابی روش هضم خشک سرب | گرم 0.15 ± 0.05 | ۲۸/۷۲ | ۱۰ ppb | ۴۲ ppb | ۳۷ ppb | ۳۸ ppb | ۵۱ ppb | ۴۵ ppb | ۶/۲۴ ppb | ۲/۵۴ ppb | ۱۱۰ |
| بازیابی روش هضم اسیدی کادمیوم | گرم 0.15 ± 0.07 | ۲۳۹/۲ ppb | ۵۰ ppb | ۲۹۷ ppb | ۲۸۷ ppb | ۲۸۳ ppb | ۲۷۹ ppb | ۲۹۵ ppb | ۲۸۸/۲ ppb | ۶/۲۴ ppb | ۹۹/۷ |
| بازیابی روش هضم خشک کادمیوم | گرم 0.15 ± 0.09 | ۲۳۹/۲ ppb | ۵۰ ppb | ۳۴۰ ppb | ۳۵۰ ppb | ۱۹۸ ppb | ۳۳۹ ppb | ۲۱۱ ppb | ۵۱/۸ ppb | ۸/۴۹ ppb | ۹۹/۵ |

روش هضم کوره برخوردار است بنابراین، موارد مورد بررسی به روش هضم اسیدی انجام شد.

نتایج حاصل از صحه‌گذاری

به‌منظور صحه‌گذاری اطلاعات رگرسیون خطی از منحنی کالیبراسیون سرب و کادمیوم استفاده شد. نتایج حاصل از

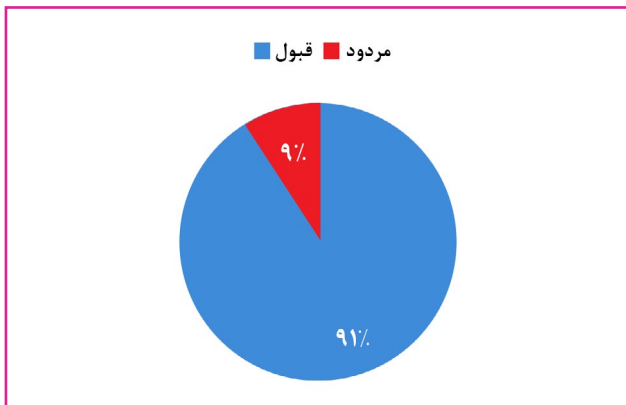
آزمون‌ها با استفاده از LOQ، درصد بازیابی و انحراف استاندارد نسبی^۹ صحه‌گذاری شد. نتایج در جدول (۴) نشان داده شده‌است.

تحلیل نتایج

با توجه به اینکه هر دو روش هضم اسیدی و خشک اختلاف

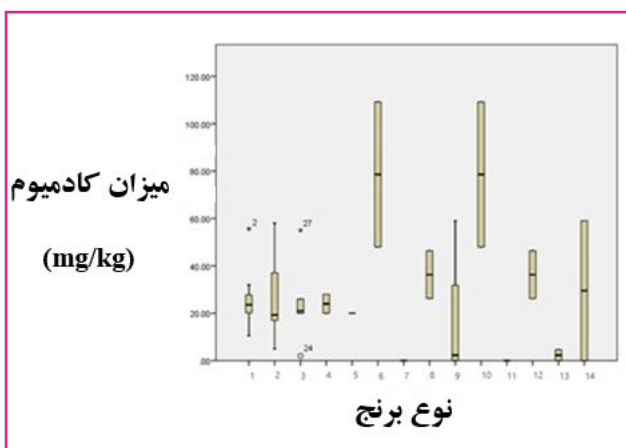
جدول (۴): نتایج حاصل از صحه‌گذاری و معادله خط منحنی استاندارد فلزهای مورد سنجش.

| حد تعیین کمی شدن | حد تشخیص | انحراف استاندارد نسبی | شیب خط | معادله منحنی کالیبراسیون | مدل | میانگین | فلز مورد سنجش |
|------------------|-----------|-----------------------|--------|--------------------------|-----|---------|---------------|
| ۹/۰۹ ppb | ۳/۰۳۰ ppb | ۰/۰۰۲۹۳ | ۰/۰۰۲۹ | $Y=0.0029X+0.0265$ | خطی | ۰/۰۰۰۷۹ | سرب |
| ۰/۲۰۱ ppb | ۰/۰۶۷ ppb | ۰/۰۰۲۲۴۸ | ۰/۰۹۹۴ | $Y=0.0994X+0.0119$ | خطی | ۰/۰۰۰۱۰ | کادمیوم |



شکل (۲): درصد نمونه‌های قبول و مردود شده در اندازه‌گیری میزان سرب در انواع برنج نمونه‌برداری شده از سطح عرضه در سال ۱۴۰۱.

نتایج حاصل از تعیین میزان کادمیوم بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در انواع برنج در مجموع ۴۵ نمونه در شکل (۳) نشان داده شده‌است.



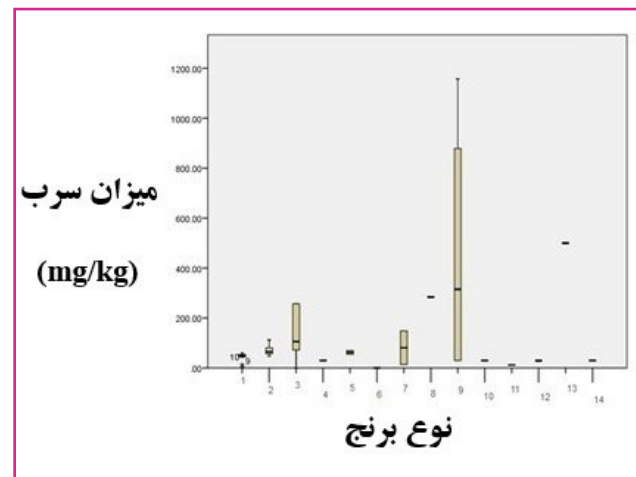
شکل (۳): نتایج حاصل از تعیین میزان کادمیوم بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در انواع برنج.

تجزیه و تحلیل نمونه‌ها نشان می‌دهد که برنج‌های نوع (۶) و (۱۰) بیشترین مقدار کادمیوم را داشته‌اند. نتایج براساس آنالیز واریانس یک طرفه بررسی شد و حروف لاتین روی ستون‌ها بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها است. آنالیز آماری نتایج نشان می‌دهد که میزان کادمیوم در برنج‌ها اختلاف معنی‌دار $p > 0.05$ دارد؛ بنابراین، فرض صفر یا برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

نتایج به‌دست آمده در رابطه با میانگین کادمیوم موجود در برنج‌ها ۲۵/۴۷ ppb است که بیشترین میزان کادمیوم ۱۰۹ ppb مربوط به نمونه (۶) و کمترین ۰/۱ ppb مربوط به نمونه (۱۱) است. همچنین نتایج ذکر شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که ۹۷/۸ درصد از نمونه‌ها در محدوده مجاز ۶۰ ppb بوده و ۲/۲ درصد خارج از حدود مجاز هستند.

معنی‌داری ندارند بنابراین، از روش هضم خشک برای انجام دیگر برآوردهای انواع برنج‌ها استفاده شد که نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

در نمودار شکل (۱) نتایج حاصل از تعیین میزان سرب بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در انواع برنج‌ها که در مجموع ۴۵ نمونه که شامل ۱۴ نشان تجاری مختلف است، نشان داده شده‌است.



شکل (۱): نتایج حاصل از تعیین میزان سرب بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در انواع برنج‌ها.

تجزیه و تحلیل نتایج آماری

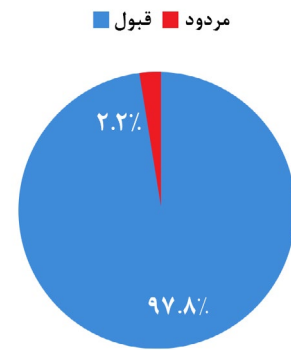
نمونه‌ها براساس انواع گوناگون برنج موجود در سطح عرضه نشان می‌دهد که برنج‌های نوع (۸) و (۱۳) بیشترین مقدار سرب را داشته‌اند. نتایج براساس آنالیز واریانس یک طرفه بین میانگین‌ها است. آنالیز آماری نشان می‌دهد که میزان سرب در انواع برنج اختلاف معنی‌داری دارد ($P > 0.05$)؛ بنابراین، فرض صفر یا برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K$$

میانگین غلظت سرب موجود در ۱۴ نمونه از انواع برنج در حدود ۷۸/۳۷ ppb به‌دست آمد. دامنه به‌دست آمده بین ۳ ppb تا ۵۰۰ ppb بوده است. میزان سرب ۹۱/۲ درصد از نمونه‌ها در محدوده مجاز ۱۵۰ ppb و ۸/۸ درصد خارج از حدود مجاز هستند که در نمودار شکل (۲) نشان داده شده‌است.

مراجع

- [1] National Standard No. 127 of 2019 Rice – Specifications and test methods.
- [2] WHO (2003). Lead in drinking- water background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality ,world health organization (Who/SDE) WSH/03, 04/a.
- [3] P. Ziarati, N. Azizi, Int. J. Pl. An and Env.Sci,4(2) (2014) 280 - 287.
- [4] K. Zhao, W.Fu, Z. Ye, Ch. Zhang, Int. J. Environ. Res. Public Health, 12(2)(2015) 1577 -1594.
- [5] R. Goyer, T. Clakson ,Toxic effects of metals, 6th ed., In : Klaassen CD. Casarett and Doll; Toxicology: The Basic Science of Poisons,McGraw Hill-Press, NewYork.2001.
- [6] R. Lawley, L .Curtis , J.Davi ,The food safety hazard guidebook. Royal Society of Chemistry (PSC) publishing, UK: RSC Publishing,2012.
- [7] M .Mohammadi , A. RiyahiBakhtiari, S. Khodabandeh , Journal of Toxicology,2(2014) 1 -5.
- [8] A. D.Eaton , L. S.Clesceri, E. W.Rice, A. E. Greenberg, Standard Methods for the Examination of Water & Waste water , 21st ed., American Public Health Association,2005.
- [9] G.J. Norton et al., Science of the Total Environment, 485–486 (2014) 428–434
- [10] R . Jafai – Moghadam, p . Ziarati, M.H. salehi-sormaghi, M.Qomi , Biomedical and Pharmacology Journal,(2015) 8 14a-Iss.
- [11] G. R.Jahed Khaniki, M. A. Zazoli, International Journal of Agriculture and Biology, 7(2005)1026–1029.
- [12] M.Afshar,S. Ghazaei , E. saad, Determiation at cadmium Amol arred Thiland Rce 4th international iRANIAN congress on poisting Tehran. IRAN www.irandoc.ac.ir, 1995.
- [13] National Standard No. 9266 of 1402 for Food-stuffs - Determination of lead, cadmium, copper, iron, zinc and chromium by atomic absorption spectrophotometry after dry digestion



شکل (۴): درصد نمونه‌های قبول و مردود در اندازه‌گیری میزان کادمیوم در برنج‌های نمونه‌برداری شده از سطح عرضه سال ۱۴۰۱.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مقایسه دو روش هضم اسیدی و خشک در نمونه‌های برنج نشان داد که درصد بازیابی سرب در روش اسیدی ۱۰۳ درصد و بازیابی روش خشک ۱۱۰ درصد و همچنین درصد بازیابی کادمیوم در روش اسیدی ۹۹/۷ درصد و بازیابی روش خشک ۹۹/۵ درصد است اما نتایج آزمون تی بین دو روش هضم خشک و هضم اسیدی اختلاف معنی‌داری نشان نمی‌دهد. نتیجه‌گیری نهایی مقایسه این دو روش نشان می‌دهد که بین دو روش اختلاف معنی‌داری وجود ندارد اما روش هضم اسیدی برای برنج توصیه می‌شود.

نتایج مقایسه نمونه‌های انواع برنج مورد آزمون فلز سرب و کادمیوم نشان می‌دهد که برخی از انواع برنج‌ها از درصد میانگین سرب و کادمیوم بالاتری نسبت به برخی دیگر برخوردار هستند. نتایج آنالیز واریانس یک طرفه به روش SPSS و مقایسه میانگین نمونه‌های برنج انجام شد. همچنین میزان سرب و کادمیوم به ترتیب در ۹۷/۸ و ۹۱/۱ درصد انواع برنج در محدوده مجاز بود.

پی‌نوشت

1. Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry (GFAAS)
2. T-test
3. Ourzia sativa
4. Desiccator
5. Level of Development (LOD)
6. Limit Of Quantification (LOQ)
7. Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)
8. One- way ANOVA
9. Relative Standard Deviation(RSD)

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، گامی نو در تشخیص مولکولی

نویسندگان

شکوفه حبیبی منش^۱

محمد شفيعی^۲*

۱. کارشناس فنی بخش ژنتیک آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه

شهید چمران اهواز

۲. مدیریت آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*Sh.habibi2520@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹



واژه‌های کلیدی

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز، زیست‌شناسی مولکولی، ژنتیک، DNA.

چکیده

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز از زمان معرفی‌اش در دهه ۱۹۸۰، انقلابی در زیست‌شناسی مولکولی، ژنتیک و تحقیقات پزشکی ایجاد کرده است. با این حال، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی^۱ با محدودیت‌هایی از جمله مشکلات دقت، حساسیت پایین به جهش‌های نادر و آسیب‌پذیری به بازدارنده‌ها مواجه است. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای^۲ با تقسیم نمونه‌های DNA به هزاران یا میلیون‌ها محفظه جداگانه، این چالش‌ها را برطرف کرده و امکان اندازه‌گیری دقیق مولکول‌های DNA یا RNA بدون نیاز به نمودارهای کالیبراسیون یا کنترل‌های داخلی را فراهم می‌کند. این مقاله به بررسی مزایای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نسبت به واکنش زنجیره‌ای سنتی، از جمله دقت بالاتر در کمیت‌سنجی مولکول‌ها، حساسیت بیشتر، کاهش تأثیر بازدارنده‌ها و قابلیت اندازه‌گیری مقادیر مطلق می‌پردازد. توانایی منحصر به فرد واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در شناسایی جهش‌های نادر ژنتیکی، تحلیل تغییرات پیچیده ژنتیکی و انجام تحلیل‌های محیطی و قانونی، آن را به ابزاری ارزشمند تبدیل کرده است. با وجود مزایای آن، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، زمان پردازش طولانی‌تر و نیاز به آماده‌سازی دقیق نمونه‌ها مواجه است. در کل، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای پیشرفت قابل توجهی در زیست‌شناسی مولکولی است و انتظار می‌رود با پیشرفت‌های فناورانه و کاهش هزینه‌ها، به‌طور گسترده‌تری در آزمایشگاه‌های زیست‌شناسی و پزشکی مورد استفاده قرار گیرد.

مقدمه

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز یکی از پیشگامان مهم در فناوری زیست‌شناسی مولکولی است که انقلابی در حوزه‌های زیست‌شناسی، ژنتیک، و تحقیقات پزشکی ایجاد کرده است. از زمان معرفی این روش در دهه ۱۹۸۰ توسط کاری مولیس^۳، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز به‌عنوان ابزاری اصلی برای تکثیر و شناسایی قطعات DNA در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، ظهور فناوری‌های نوین مانند واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای موجب بهبود قابلیت‌ها و کاهش محدودیت‌های واکنش زنجیره‌ای سنتی شده است. در این مقاله، به بررسی مزایای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نسبت به واکنش زنجیره‌ای سنتی پرداخته و کاربردهای عملی آن را در حوزه‌های مختلف توضیح می‌دهیم [۱].

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی و چالش‌های آن

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی فرآیندی است که طی آن توالی‌های خاصی از DNA از طریق تکرار مراحل گرم و سرد شدن، تکثیر می‌شوند. این روش به دلیل سادگی و کارایی بالا در کاربردهای گسترده‌ای همچون ژنوتایپینگ، کلونینگ، تشخیص بیماری‌ها و تحقیقات پایه به کار می‌رود. با این حال، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی با چالش‌هایی همچون عدم دقت در اندازه‌گیری کمیت DNA، حساسیت پایین به جهش‌های نادر و تاثیرات بازدارنده‌ها مواجه است [۲].

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای (dPCR)

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای یک فناوری پیشرفته‌تر و اصلاح شده از واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی است که نمونه DNA را به هزاران یا میلیون‌ها محفظه کوچک تقسیم می‌کند. هر یک از این محفظه‌ها به‌طور جداگانه در فرآیند واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قرار می‌گیرد و پس از پایان واکنش، تعداد محفظه‌های حاوی محصول واکنش زنجیره‌ای پلیمرز شناسایی می‌شود. این فرآیند منجر به شناسایی و اندازه‌گیری دقیق تعداد مولکول‌های DNA یا RNA می‌شود، بدون نیاز به استفاده از نمودار کالیبراسیون یا کنترل داخلی که در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی^۴ مورد نیاز است [۳].

مزایای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نسبت به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی

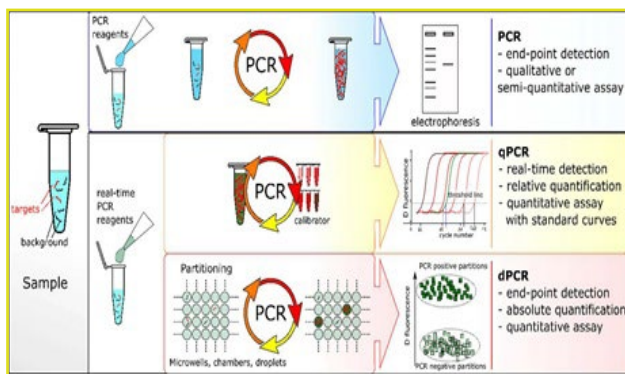
• دقت بالاتر واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در اندازه‌گیری تعداد مولکول‌ها:

یکی از بزرگترین مزایای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نسبت به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی، دقت بسیار بالا در اندازه‌گیری تعداد مولکول‌های DNA یا RNA است. در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، به دلیل تقسیم‌بندی دقیق نمونه به محفظه‌های کوچک، امکان شمارش مستقیم تعداد مولکول‌ها فراهم می‌شود. برخلاف واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی که نتایج به‌صورت نسبی ارائه می‌شوند، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نتایج را به‌صورت مطلق ارائه می‌دهد.

در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی، تخمین کمیت DNA

براساس منحنی استاندارد و مقایسه با نمونه‌های کنترل صورت می‌گیرد. این روش وابسته به کارایی واکنش است که ممکن است تحت تاثیر عوامل مختلف مانند ترکیبات نمونه، غلظت آغازگرها و مواد بازدارنده قرار گیرد. از سوی دیگر، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای از این مشکلات بی‌نیاز است و شمارش مستقیم از محفظه‌های واکنش زنجیره‌ای پلیمرز دقیق‌تر و مستقل از کارایی واکنش است [۳ و ۴].

در شکل (۱) سه نوع مختلف از روش‌های واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای را مقایسه می‌کند. در قسمت بالایی شکل، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی نشان داده شده که پس از تکثیر DNA، محصول نهایی با روش ژل الکتروفورز ارزیابی می‌شود و نتایج کیفی یا نیمه‌کمی ارائه می‌دهد. در بخش میانی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی یا واکنش زنجیره‌ای پلیمرز در زمان واقعی به تصویر کشیده شده که از منحنی‌های استاندارد برای اندازه‌گیری نسبی مقدار DNA استفاده می‌کند و به‌طور هم‌زمان تکثیر DNA و اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. در بخش پایینی شکل، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نشان داده شده که نمونه DNA به هزاران بخش کوچک تقسیم می‌شود و تکثیر در هر بخش به‌طور جداگانه صورت می‌گیرد و نتایج کمی مطلق و با دقت بالا ارائه می‌شود. این فناوری‌ها از نظر حساسیت، دقت و چگونگی تحلیل نتایج با یکدیگر تفاوت دارند و به نیازهای مختلف در زیست‌شناسی مولکولی پاسخ می‌دهند.



شکل (۱): مقایسه روش‌های مبتنی بر واکنش زنجیره‌ای پلیمرز [۵].

• حساسیت بیشتر واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به دلیل قابلیت شناسایی دقیق مولکول‌های DNA در مقادیر بسیار کم، حساسیت بالاتری نسبت به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی دارد. این ویژگی به‌خصوص در کاربردهایی که نیاز به تشخیص تغییرات نادر ژنتیکی و یا ویروس‌هایی با بار ویروسی کم دارند، بسیار

پلیمرز قطرهای، قابلیت شناسایی و تشخیص جهش‌های نادر ژنتیکی است. در بسیاری از کاربردهای پزشکی، به ویژه در تشخیص سرطان و بیماری‌های ژنتیکی، شناسایی جهش‌های نادر اهمیت زیادی دارد. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای به دلیل حساسیت بالا و توانایی شمارش مستقیم مولکول‌ها، این امکان را فراهم می‌کند که حتی جهش‌های نادر که در غلظت‌های بسیار کم در نمونه وجود دارند، به صورت دقیق شناسایی شوند.

این توانایی به خصوص در تشخیص جهش‌های مهم مرتبط با سرطان، مانند جهش‌های نقطه‌ای یا تغییرات در تعداد کپی ژنوم تومور، مفید است. در مقایسه با واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی که ممکن است به دلیل تعداد کم جهش‌ها از تشخیص باز بماند، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای می‌تواند تغییرات ژنتیکی را با دقت بیشتری شناسایی کند [۸].

• قابلیت تحلیل پیچیده‌تر واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای قابلیت انجام تحلیل‌های پیچیده‌تر را فراهم می‌کند. به دلیل استفاده از محفظه‌های جداگانه و واکنش‌های مستقل، امکان بررسی توالی‌های چندگانه و انواع مختلف مولکول‌ها در یک نمونه واحد فراهم است. این ویژگی باعث می‌شود که واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای در مطالعات ژنتیکی پیچیده، مانند بررسی توالی‌های هموزیگوت و هتروزیگوت، بررسی میکروبیوم‌ها و تحلیل تغییرات اپی‌ژنتیکی به کار گرفته شود.

به‌عنوان مثال، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای می‌تواند در تعیین تعداد نسخه‌های ژنی که در بسیاری از بیماری‌های ژنتیکی نقش دارند، موثرتر عمل کند. در این فرآیند، نمونه به محفظه‌های متعدد تقسیم می‌شود و هر محفظه به‌طور جداگانه برای تعیین تعداد نسخه‌های ژنی تحلیل می‌شود که نتایج بسیار دقیق‌تری را نسبت به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی ارائه می‌دهد [۲].

کاربردهای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای در تحقیقات و صنعت

• تشخیص بیماری‌های عفونی

در تشخیص بیماری‌های عفونی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای به‌عنوان یک ابزار بسیار دقیق و حساس مطرح است. برای مثال، در تشخیص ویروس‌هایی مانند ایدز، هپاتیت و سارس واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای می‌تواند ویروس‌ها

مهم است. برای مثال، در تشخیص سرطان‌هایی که از تغییرات ژنتیکی نادر در سلول‌ها شروع می‌شوند، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای می‌تواند به سرعت و با دقت بیشتری این تغییرات را شناسایی کند.

این حساسیت بالا همچنین برای شناسایی جهش‌های نادر و مقادیر پایین ویروس‌ها در نمونه‌های بالینی بسیار مفید است. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای می‌تواند در شرایطی که واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی ممکن است به دلیل غلظت کم مولکول‌های هدف ناموفق باشند، نتایج مثبتی ارائه دهد [۶].

• کاهش اثرات بازدارنده‌ها در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای

در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی، وجود مواد بازدارنده در نمونه (مانند پروتئین‌ها، نمک‌ها و یا سایر ترکیبات آلی) می‌تواند باعث کاهش کارایی واکنش شود. این مسئله به ویژه در کار با نمونه‌های زیستی پیچیده مانند خون، بافت‌های آلوده یا فاضلاب‌ها مشکل‌ساز است. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای به دلیل تقسیم‌بندی نمونه به محفظه‌های کوچک، اثرات بازدارنده‌ها را به حداقل می‌رساند و واکنش‌های موفق‌تری در هر محفظه ایجاد می‌شود.

این ویژگی به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای اجازه می‌دهد تا حتی در حضور مواد بازدارنده، نتایج دقیق و قابل اعتمادی ارائه دهد. از این رو، این فناوری برای کاربردهایی که نمونه‌های زیستی پیچیده و آلوده دارند، مانند آنالیزهای محیطی یا تشخیص بیماری‌های عفونی، بسیار مناسب است [۷].

• اندازه‌گیری مطلق بدون نیاز به استاندارد داخلی در روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای

در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی، برای اندازه‌گیری دقیق، نیاز به استفاده از یک استاندارد داخلی یا نمودار کالیبراسیون است. این استانداردها برای محاسبه کمیت نسبی DNA استفاده می‌شوند، اما خود می‌توانند منبع خطا باشند. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای نیازی به استاندارد داخلی ندارد و کمیت DNA به‌صورت مطلق و مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. این امر، فرآیند را ساده‌تر و دقیق‌تر می‌کند، زیرا از تاثیرات نوسانات استاندارد داخلی بر نتیجه نهایی جلوگیری می‌شود [۶].

• کاربرد واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطرهای در تشخیص جهش‌ها و توالی‌های نادر

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد واکنش زنجیره‌ای

آلوده‌کننده مانند نفت یا فلزات سنگین را دارند، استفاده شود. این فناوری می‌تواند با دقت بالا، وجود یا عدم وجود این میکروارگانیسم‌ها را در محیط‌های آلوده تعیین کرده و به مهندسان زیست‌محیطی کمک کند تا راه‌حل‌های مؤثرتری برای تصفیه محیط‌زیست ارائه دهند. در فرآیند زیست‌تصفیه، باکتری‌ها و قارچ‌های خاصی می‌توانند به تجزیه ترکیبات پیچیده و آلوده‌کننده بپردازند. این میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در پاکسازی زیست‌محیطی دارند، اما شناسایی آن‌ها در محیط‌های آلوده می‌تواند دشوار باشد. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به محققان و مهندسان محیط‌زیست امکان می‌دهد که به دقت نوع و مقدار میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده را شناسایی کنند. این کار با شمارش مستقیم تعداد مولکول‌های DNA میکروارگانیسم‌ها در نمونه‌های آلوده انجام می‌شود [۱۲].

• واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای و کاربردهای پزشکی قانونی

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای همچنین در زمینه پزشکی قانونی اهمیت بالایی دارد. در موارد جنایی، توانایی واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در تشخیص DNA از نمونه‌های بسیار کوچک و حتی به شدت تخریب شده، آن را به ابزاری حیاتی در تحقیقات جرم‌شناسی تبدیل کرده است. به‌عنوان مثال، در صحنه‌های جرم که تنها مقادیر بسیار کمی از DNA باقی‌مانده است، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای می‌تواند با دقت بیشتری این نمونه‌ها را تقویت و شناسایی کند و به تعیین هویت افراد کمک کند. این فناوری به دلیل توانایی شناسایی جهش‌ها و تغییرات کوچک ژنتیکی، می‌تواند در شناسایی و تطبیق DNA مجرمان با نمونه‌های DNA یافت شده در صحنه جرم بسیار موثر باشد [۱۲].

• تعیین کیفیت محصولات زیستی و دارویی

در صنعت فناوری زیستی و داروسازی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای می‌تواند برای کنترل کیفیت محصولات زیستی و دارویی استفاده شود. به‌عنوان مثال، در تولید واکسن‌ها و یا داروهای مبتنی بر DNA و RNA، کنترل دقیق تعداد مولکول‌ها اهمیت زیادی دارد. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که تعداد مولکول‌های فعال در هر دوز از یک دارو یا واکسن را به‌صورت دقیق تعیین و از یکدست بودن کیفیت محصولات اطمینان حاصل کنند. این موضوع به ویژه در تولید داروهای ژنی و واکسن‌های جدید مبتنی بر mRNA بسیار حائز اهمیت است [۱۳].

را در غلظت‌های بسیار پایین شناسایی کند. این ویژگی به‌خصوص برای تشخیص زودهنگام و کنترل بیماری‌ها بسیار مهم است [۹].

• تحقیقات سرطان

یکی از کاربردهای مهم واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در تحقیقات سرطان است. این فناوری برای شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات ژنتیکی که در سلول‌های سرطانی رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در تشخیص سرطان‌های مرتبط با جهش‌های ژنی مانند جهش در ژن‌های EGFR، KRAS و یا BRAF واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای می‌تواند جهش‌های نادر را با دقت بالایی شناسایی کند. این ویژگی به پژوهشگران و پزشکان کمک می‌کند تا درمان‌های هدفمند و دقیق‌تری برای بیماران طراحی کنند [۱۰].

• ژنتیک و مطالعات مرتبط با تنوع تعداد نسخه‌های ژنی

در مطالعات ژنتیکی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای برای اندازه‌گیری دقیق تنوع تعداد نسخه‌های ژنی که در بسیاری از بیماری‌های ژنتیکی و سرطان‌ها نقش دارند، به کار می‌رود. تنوع تعداد نسخه‌های ژنی می‌تواند نقش مهمی در بروز بیماری‌ها و تنوع ژنتیکی انسان داشته باشند. به کارگیری دقیق واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در اندازه‌گیری تنوع تعداد نسخه‌های ژنی، امکان بررسی بهتر و جامع‌تری از تغییرات ژنتیکی را فراهم می‌کند. این تغییرات می‌توانند بر عملکرد ژن‌ها تأثیرگذار باشند و با بیماری‌هایی نظیر سرطان، بیماری‌های خودایمنی و اختلالات عصبی مرتبط شوند. در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی و حتی واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، شناسایی تنوع تعداد نسخه‌های ژنی به‌طور معمول چالش‌برانگیز است، چرا که این روش‌ها حساسیت و دقت کافی برای تعیین تعداد نسخه‌ها در سطح مولکولی ندارند. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای با قابلیت شمارش دقیق مولکول‌های DNA این امکان را فراهم می‌کند که تعداد نسخه‌های ژنی را به‌صورت مطلق اندازه‌گیری کنیم، که این موضوع برای تحلیل ژن‌های مختلف در بیماری‌های ژنتیکی بسیار مفید است [۱۱].

• زیست‌شناسی محیطی و زیست‌تصفیه

در زیست‌شناسی محیطی، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نقش مهمی در پایش آلودگی‌های محیطی و تشخیص میکروارگانیسم‌های مسؤل تجزیه آلاینده‌ها ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، در مطالعات زیست‌تصفیه، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای می‌تواند برای شناسایی گونه‌های خاصی از باکتری‌ها و یا قارچ‌ها که توانایی تجزیه مواد

چالش‌ها و محدودیت‌های واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای

با وجود مزایای فراوان واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، این فناوری همچنان با چالش‌هایی مواجه است. یکی از محدودیت‌های واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای، هزینه‌های بالای تجهیزات و مواد مصرفی است. تجهیزات واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نیاز به فناوری‌های پیشرفته‌تری نسبت به واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمتی و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی دارند و در نتیجه هزینه خرید و نگهداری آنها بالاتر است. همچنین، زمان لازم برای انجام واکنش‌ها در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به‌طور معمول طولانی‌تر از واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمتی بوده که ممکن است در برخی موارد کارایی را کاهش دهد.

علاوه بر این، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای نیازمند روش‌های دقیق‌تری برای آماده‌سازی نمونه‌ها است. تقسیم‌بندی دقیق نمونه‌ها به تعداد زیادی محفظه، نیاز به تجهیزات و مهارت‌های ویژه دارد که این موضوع می‌تواند زمان‌بری فرآیند را افزایش دهد. در عین حال، حساسیت بالای این روش نسبت به آلودگی‌های احتمالی نیز ممکن است به خطاهای آزمایشی منجر شود [۲].

مقایسه دقیق‌تر واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای و واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمتی

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در مقایسه با واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمتی که خود نسخه‌ای پیشرفته‌تر از واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی است و توانایی اندازه‌گیری نسبی DNA را با استفاده از فلورسانس در هر چرخه فراهم می‌کند، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به‌صورت مطلق تعداد مولکول‌های هدف را در هر نمونه شمارش می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود که واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای در شرایطی که نیاز به اندازه‌گیری دقیق و بدون وابستگی به استانداردهای خارجی است، برتری پیدا کند. در واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمتی، تخمین تعداد مولکول‌های DNA براساس نمودار کالیبراسیون صورت می‌گیرد که ممکن است به دلیل نوسانات فنی و یا شرایط مختلف آزمایشگاهی دچار تغییر شود. در حالی که واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای با تقسیم نمونه به محفظه‌های جداگانه و انجام واکنش زنجیره‌ای پلیمرز در هر محفظه به‌صورت مستقل، نتایج دقیق‌تری به‌دست می‌آورد [۲ و ۳].

نتیجه‌گیری

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای ابزاری قدرتمند و دقیق در حوزه زیست‌شناسی مولکولی است که بر بسیاری از چالش‌های مرتبط با واکنش زنجیره‌ای پلیمرز سنتی غلبه کرده است. توانایی این فناوری در اندازه‌گیری دقیق تعداد مولکول‌های DNA و RNA، شناسایی جهش‌های نادر و کاهش اثرات مواد بازدارنده، آن را به یک روش انقلابی تبدیل کرده است. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای با وجود چالش‌های موجود، در حال گسترش کاربردهای خود در حوزه‌های پزشکی، زیست‌محیطی، قانونی و صنعت فناوری زیستی است. با این حال، هزینه‌ها و پیچیدگی‌های فنی واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به‌عنوان چالش‌های اصلی این روش محسوب می‌شوند. اما با پیشرفت‌های فناورانه و افزایش دسترسی به تجهیزات پیشرفته‌تر، انتظار می‌رود که واکنش زنجیره‌ای پلیمرز قطره‌ای به‌عنوان ابزاری استاندارد در آزمایشگاه‌های زیست‌شناسی مولکولی و پزشکی مورد استفاده گسترده‌تری قرار گیرد [۵].

پی‌نوشت

1. Polymerase Chain Reaction (PCR)
2. Digital PCR (dPCR)
3. Kary Mullis
4. Quantitative polymerase chain reaction (qPCR)
5. Copy number variation (CNV)
6. Human immunodeficiency virus (HIV)
7. SARS-CoV-2
8. Copy number variation (CNVs)

- [1] Pinheiro, L.B., Coleman, V.A., Hindson, C.M., Herrmann, J., Hindson, B.J., Bhat, S. and Emslie, K.R., 2012. Evaluation of a droplet digital polymerase chain reaction format for DNA copy number quantification. *Analytical chemistry*, 84(2), pp.1003-1011.
- [2] Mao X, Liu C, Tong H, Chen Y, Liu K. Principles of digital PCR and its applications in current obstetrical and gynecological diseases. *American journal of translational research*. 2019;11(12):7209.
- [3] Hindson BJ, Ness KD, Masquelier DA, Belgrader P, Heredia NJ, Makarewicz AJ, Bright IJ, Lucero MY, Hiddessen AL, Legler TC, Kitano TK. High-throughput droplet digital PCR system for absolute quantitation of DNA copy number. *Analytical chemistry*. 2011 Nov 15;83(22):8604-10.
- [4] Kuypers J, Jerome KR. Applications of digital PCR for clinical microbiology. *Journal of clinical microbiology*. 2017 Jun;55(6):1621-8.
- [5] Quan PL, Sauzade M, Brouzes E. dPCR: a technology review. *Sensors*. 2018 Apr 20;18(4):1271.
- [6] Day E, Dear PH, McCaughan F. Digital PCR strategies in the development and analysis of molecular biomarkers for personalized medicine. *Methods*. 2013 Jan 1;59(1):101-7.
- [7] Huggett JF, Novak T, Garson JA, Green C, Morris-Jones SD, Miller RF, Zumla A. Differential susceptibility of PCR reactions to inhibitors: an important and unrecognised phenomenon. *BMC research notes*. 2008 Dec;1:1-9.
- [8] Vogelstein B, Kinzler KW. Digital pcr. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1999 Aug 3;96(16):9236-41.
- [9] Rashid SA, Nazakat R, Muhamad Robot R, Ismail R, Suppiah J, Rajendran K, Raj Louis Masalamany AS, Muhamad Hendri NA, Mohamad N, Khairul Hasni NA, Suib FA. Droplet digital PCR application for the detection of SARS-CoV-2 in air sample. *Frontiers in Public Health*. 2023 Oct 27;11:1208348.
- [10] Huerta M, Rosello S, Sabater L, Ferrer A, Tarazona N, Roda D, Gambardella V, Alfaro-Cervello C, Garces-Albir M, Cervantes A, Ibarrola-Villava M. Circulating tumor DNA detection by digital-droplet PCR in pancreatic ductal adenocarcinoma: a systematic review. *Cancers*. 2021 Feb 27;13(5):994.
- [11] Woon ST, Mayes J, Quach A, Longhurst H, Ferrante A, Ameratunga R. Droplet digital PCR for identifying copy number variations in patients with primary immunodeficiency disorders. *Clinical and experimental immunology*. 2022 Mar 1;207(3):329-35.
- [12] Kuypers J, Jerome KR. Applications of digital PCR for clinical microbiology. *Journal of clinical microbiology*. 2017 Jun;55(6):1621-8.
- [13] Whitley J, Zwolinski C, Denis C, Maughan M, Hayles L, Clarke D, Snare M, Liao H, Chiou S, Marmura T, Zoeller H. Development of mRNA manufacturing for vaccines and therapeutics: mRNA platform requirements and development of a scalable production process to support early phase clinical trials. *Translational Research*. 2022 Apr 1;242:38-55.

نویسنده

داود قرایلو*

۱. مدیر فنی آزمایشگاه DLS مرکز خدمات
آزمایشگاهی، دانشگاه صنعتی شریف

***Davoud.Gharailou@gmail.com**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

واژه‌های کلیدی

پراکندگی نور پویا، آماده سازی نمونه، مسائل فنی، اندازه گیری اندازه ذرات.

بررسی تاثیر برخی از عوامل موثر در نتایج DLS و راهکارهای کاهش خطا

چکیده

تفرق نور پویا^۱ یکی از روش‌های پرکاربرد برای اندازه‌گیری اندازه و توزیع ذرات در مقیاس نانومتری است. دقت این آزمون به آماده‌سازی نمونه و تنظیمات صحیح دستگاه بستگی دارد. غلظت نمونه عامل مهمی در دقت نتایج است. غلظت‌های بالا باعث پراکندگی چندگانه و بزرگ‌نمایی اندازه ذرات و غلظت‌های پایین موجب کاهش سیگنال و تولید نویز می‌شود. بنابراین، تنظیم غلظت در محدوده بهینه (۰/۱ تا ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) برای نتایج معتبر ضروری است. پایداری نمونه نیز نقش کلیدی دارد. تجمع ذرات، رسوب‌گذاری و تجزیه شیمیایی می‌توانند نتایج را منحرف کنند. برای جلوگیری از این مشکلات، استفاده از پایدارکننده‌های شیمیایی، تنظیم pH و انجام آزمون در کوتاه‌ترین زمان ممکن توصیه می‌شود. عوامل دستگاه نیز باید به دقت تنظیم شوند. زاویه پراش، زمان اندازه‌گیری و دمای آزمون از عوامل تأثیرگذار بر نتایج هستند. زاویه ۱۷۳ درجه برای نمونه‌های غلیظ و ۹۰ درجه برای نمونه‌های رقیق مناسب‌تر است. مدت زمان مناسب اندازه‌گیری (۳۰ تا ۱۸۰ ثانیه) و کنترل دما برای جلوگیری از تغییرات ناخواسته در اندازه ذرات ضروری هستند. در این مقاله به‌صورت اجمالی برخی از عواملی که می‌تواند منشاء خطا در آزمون‌های DLS شوند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند و راهکارهایی برای انجام دقیق‌تر این آزمون‌ها ارائه می‌شود.

تفرق نور پویا یا DLS یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد در علم نانومواد و بیوفیزیک است که برای اندازه‌گیری اندازه ذرات در مقیاس نانومتر تا میکرومتر استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر تحلیل تغییرات شدت نور پراکنده شده از ذرات معلق در یک محیط سیال است. دستگاه DLS با استفاده از یک منبع نور لیزری، پرتو نوری را به نمونه می‌تاباند و میزان تغییرات شدت نور را که در اثر حرکت براونی ذرات ایجاد می‌شود، ثبت و پردازش می‌کند. براساس این داده‌ها، اندازه هیدرودینامیکی ذرات و توزیع آن‌ها تعیین می‌شود.

DLS در حوزه‌های مختلفی از جمله علوم دارویی، زیست‌شناسی، شیمی، فیزیک مواد و مهندسی نانو کاربرد دارد. در تحقیقات فناوری نانو، این دستگاه برای بررسی پایداری نانوذرات، تعیین میزان تجمع آن‌ها و ارزیابی توزیع اندازه ذرات به کار می‌رود. در زیست‌شناسی، از DLS برای مطالعه پروتئین‌ها، ویروس‌ها و سایر زیست‌مولکول‌های معلق در محیط‌های مایع استفاده می‌شود. همچنین در صنایع داروسازی، بررسی توزیع اندازه نانوذرات دارویی با این روش اهمیت زیادی دارد، زیرا اندازه ذرات تأثیر مستقیمی بر جذب، رهایش و اثربخشی دارو دارد. در شکل (۱) نمایی از چگونگی قرار گرفتن نمونه در دستگاه DLS نشان داده شده است.



شکل (۱): نمایی از چگونگی قرار گرفتن نمونه در دستگاه DLS.

اهمیت انجام صحیح آزمون‌های DLS

دقت و صحت نتایج حاصل از دستگاه DLS به شدت وابسته به شرایط آزمایش و روش انجام اندازه‌گیری است. در صورتی که آزمون‌های DLS به درستی انجام نشوند، ممکن است نتایج نادرست و گمراه‌کننده‌ای ارائه نماید که می‌تواند منجر به خطاهای علمی و عملی در کاربردهای مختلف شود. به‌عنوان مثال، اگر غلظت نمونه بسیار بالا باشد، پدیده پراکندگی چندگانه رخ می‌دهد که باعث انحراف در اندازه‌گیری و گزارش اندازه‌های نادرست خواهد شد. از سوی دیگر، غلظت بسیار پایین می‌تواند منجر به کاهش نسبت سیگنال به نویز شده و موجب ایجاد قله‌های کاذب در توزیع اندازه ذرات شود.

آماده‌سازی مناسب نمونه، استفاده از پایدارکننده‌های شیمیایی، تنظیم pH و قدرت یونی محلول و انجام آزمایش‌ها در کوتاه‌ترین زمان پس از آماده‌سازی نمونه از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند صحت نتایج DLS را افزایش دهند. تنظیم صحیح عوامل دستگاه نظیر زاویه پراش، زمان اندازه‌گیری و کالیبراسیون با استانداردهای مرجع، تأثیر بسزایی در بهبود دقت داده‌ها دارد. به کارگیری روش‌های مکمل مانند

میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ برای تأیید نتایج، می‌تواند به درک بهتر ویژگی‌های نانومواد کمک کند.

چه عواملی بر انجام آزمون DLS موثر هستند؟

تحلیل نتایج دستگاه DLS به عوامل متعددی وابسته است که در دقت و صحت اندازه‌گیری ذرات و توزیع آنها تأثیرگذار هستند. برخی از این عوامل به اختصار در ذیل آمده است.

غلظت نمونه

غلظت بیش از حد باعث افزایش تداخل نور پراکنده شده^۴ و خطا در محاسبه اندازه ذرات می‌شود. همچنین غلظت بسیار کم، سیگنال کافی برای تحلیل ایجاد نمی‌کند. وقتی غلظت ذرات در نمونه بالا باشد، فاصله بین ذرات کاهش می‌یابد. در این حالت، پرتو لیزر قبل از رسیدن به آشکارساز، ممکن است

نیاز به غلظت بالاتر (~۱ میلی گرم بر میلی لیتر) دارند، زیرا پراکندگی نور توسط ذرات کوچک ضعیف تر است. ذرات بزرگ (به عنوان مثال، ۵۰۰ نانومتر) غلظت پایین (~۰/۱ میلی گرم بر میلی لیتر) کافی است، زیرا ذرات بزرگ نور را قوی تر پراکنده می کنند.

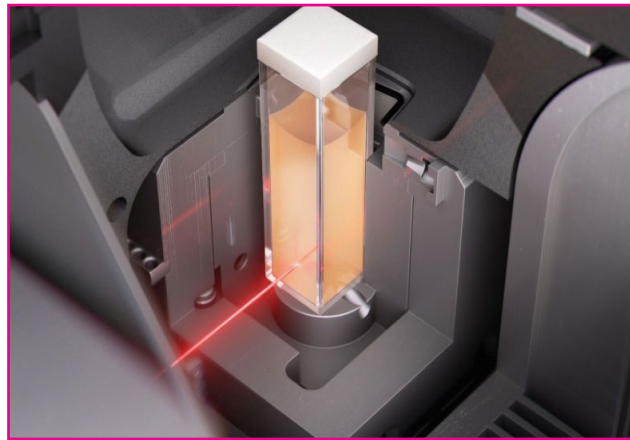
روش هایی برای تعیین غلظت بهینه وجود دارد. اندازه گیری شدت پراکندگی^۱ یکی از این روش ها است. دستگاه های DLS مدرن شدت نور پراکنده شده (بر حسب کیلوکانت بر ثانیه، kcps) را نمایش می دهند. محدوده ایده آل به طور معمول بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوکانت بر ثانیه است. به عنوان مثال، اگر شدت پراکندگی نمونه اولیه ۲۰۰۰ کیلوکانت بر ثانیه باشد، نشان دهنده غلظت بیش از حد است و باید رقیق شود. با تنظیم برخی بخش های دستگاه نظیر زاویه پراش نیز می توان اثر منفی غلظت را به حداقل رساند. برای نمونه های با غلظت بالا، استفاده از زاویه ۱۷۳ درجه تداخل نوری را کاهش می دهد.

برای نمونه های رقیق، افزایش زمان اندازه گیری (به عنوان مثال، از ۶۰ به ۱۸۰ ثانیه) باعث بهبود نسبت سیگنال به نویز می شود. در نهایت می توان گفت که غلظت نمونه یکی از مهمترین عوامل در اندازه گیری DLS است. غلظت بیش از حد منجر به پراکندگی چندگانه و گزارش اندازه های بزرگتر از واقعیت می شود، در حالی که غلظت بسیار کم باعث افزایش نویز و شناسایی قله های کاذب خواهد شد. برای دستیابی به نتایج دقیق، ضروری است که غلظت نمونه در محدوده ۰/۱ تا ۱ میلی گرم بر میلی لیتر تنظیم شود. از رقیق سازی و فیلتراسیون برای بهبود کیفیت نمونه استفاده شود. همچنین عوامل دستگاه (زاویه پراش، زمان اندازه گیری) با توجه به غلظت نمونه بهینه سازی شوند. با رعایت این نکات، می توان از خطاهای رایج جلوگیری و داده های قابل اطمینانی برای آنالیز نانوذرات به دست آورد.

پایداری نمونه

تجمع ذرات^۹ یا رسوب گذاری^{۱۰} طی اندازه گیری، نتایج را مخدوش می کند. استفاده از مواد پایدارکننده (مانند سورفکتانت ها) برای جلوگیری از تجمع ضروری است. نبود مواد پایدارکننده (مانند سورفکتانت ها) و یا شرایط نامناسب محیطی (به عنوان مثال، pH نامناسب یا قدرت یونی بالا) موجب کاهش نیروی دافعه بین ذرات شده و همین امر باعث تشکیل تجمعات می شود. حرکت براونی ذرات در غلظت های بالا نیز احتمال برخورد و تجمع را افزایش می دهد. در شکل (۳) تأثیر سورفکتانت روی تغییر محل پیک در نتایج دیده می شود. در این شکل، خط مشکی مربوط به نتیجه نانوذراتی است که بدون سورفکتانت اندازه گیری شده اند و خط قرمز مربوط به نتایجی است که پس از افزودن سورفکتانت، اندازه گیری شده اند.

از چندین ذره متوالی پراکنده شود. این پدیده باعث تغییر در تابع همبستگی^۵ و محاسبه نادرست ضریب انتشار^۶ می شود (شکل (۲)).



شکل (۲): پراش لیزر دستگاه DLS در نمونه هایی با غلظت بالا.

ضریب انتشار با اندازه ذرات رابطه معکوس دارد. اگر پراکندگی چندگانه رخ دهد، ضریب انتشار محاسبه شده کوچکتر از مقدار واقعی خواهد بود و در نتیجه، اندازه ذرات بزرگتر از حد واقعی گزارش می شود. فرض کنید نمونه حاوی نانوذرات طلا با قطر واقعی ۲۰ نانومتر است. اگر غلظت نمونه به حدی بالا باشد که پراکندگی چندگانه غالب شود، دستگاه ممکن است اندازه ذرات را ۳۰ نانومتر یا بیشتر گزارش کند. این خطا در صنایع دارویی که اندازه ذرات بر جذب و رهایش دارو تأثیر مستقیم دارد، می تواند منجر به نتایج فاجعه بار شود. اما در غلظت بسیار کم (سیگنال ضعیف) چه اتفاقی می افتد؟

نویز در داده ها یکی از پیامدهای منفی غلظت کم است. در غلظت های بسیار پایین، تعداد ذرات موجود در مسیر پرتو لیزر کافی نیست. در نتیجه، شدت نور پراکنده شده کم شده و نسبت سیگنال به نویز^۷ کاهش می یابد.

نویز بالا در تابع همبستگی می تواند منجر به شناسایی قله های کاذب در توزیع اندازه ذرات شود. برای مثال، ممکن است دستگاه وجود ذرات با اندازه های غیرواقعی (به عنوان مثال، ۱۰۰ نانومتر) را در یک نمونه رقیق گزارش کند، در حالی که چنین ذراتی وجود خارجی ندارند. در یک آزمایش با نانوذرات سیلیکا با قطر واقعی ۵۰ نانومتر، اگر نمونه بیش از حد رقیق شود (غلظت کمتر از ۰/۱ میلی گرم بر میلی لیتر)، دستگاه ممکن است به جای یک قله واضح، چندین قله با اندازه های ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ نانومتر نشان دهد که ناشی از نویز است.

در این میان تعیین غلظت بهینه برای DLS اهمیت زیادی پیدا می کند. محدوده غلظت بهینه برای DLS براساس نوع دستگاه تعیین می شود اما به طور معمول بین ۰/۱ تا ۱ میلی گرم بر میلی لیتر (برای ذرات با اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر) می تواند باشد. ذرات کوچک (به عنوان مثال، ۱۰ نانومتر)

برای بررسی تأثیر پایداری نمونه بر اندازه‌گیری نانوذرات طلا با قطر اولیه ۳۰ نانومتر به مثال زیر توجه کنید:
دو نمونه (A) و (B) آماده شده‌اند:

■ **نمونه (A):** نانوذرات طلا در آب دیونیزه + سورفکتانت (سیترات سدیم).

■ **نمونه (B):** نانوذرات طلا در آب دیونیزه (بدون پایدارکننده). هر نمونه بلافاصله پس از آماده‌سازی و در بازه‌های زمانی ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه با دستگاه DLS اندازه‌گیری شد. عوامل دستگاه: طول موج ۶۳۲ نانومتر، زاویه ۱۷۳ درجه و دمای ۲۵ سانتی‌گراد. نتایج آزمون‌های انجام شده در جدول (۱) آمده است:

جدول (۱): نتایج آزمون DLS روی دو نمونه (A) و (B).

| اندازه ذرات نمونه (A) برحسب نانومتر | PDI در نمونه (A) | اندازه ذرات نمونه (B) برحسب نانومتر | PDI در نمونه (B) | زمان (دقیقه) |
|--|------------------------|--|------------------------|-----------------|
| ۳۰ | ۰/۰۵ | ۳۰ | ۰/۰۵ | ۰ |
| ۳۱ | ۰/۰۶ | ۴۵ | ۰/۲ | ۱۵ |
| ۳۲ | ۰/۰۷ | ۷۵ | ۰/۴ | ۳۰ |
| ۳۳ | ۰/۰۸ | ۱۲۰ | ۰/۶ | ۶۰ |

تحلیل نتایج

نمونه (A) (پایدار):

اندازه ذرات طی ۶۰ دقیقه تغییر محسوسی نداشت (۳۰ به ۳۳ نانومتر) و PDI پایین باقی ماند. وجود سورفکتانت از تجمع ذرات جلوگیری کرد.

نمونه (B) (ناپایدار):

پس از ۱۵ دقیقه، اندازه ذرات به ۴۵ نانومتر افزایش یافت (تجمع جزئی). پس از ۶۰ دقیقه، اندازه ذرات به ۱۲۰ نانومتر رسید (تجمع کامل). افزایش PDI از ۰/۰۵ به ۰/۶ نشان‌دهنده ناهمگنی شدید در نمونه است.

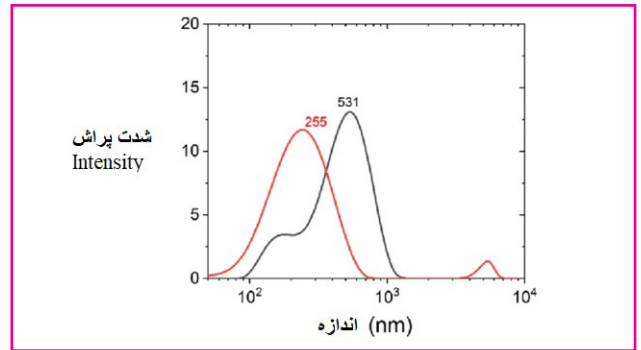
روش‌های تشخیص ناپایداری نمونه در DLS

بررسی تغییرات تابع همبستگی

در نمونه پایدار، تابع همبستگی یکنواخت و بدون نویز است. در نمونه ناپایدار، تابع همبستگی دارای نوسانات غیرعادی یا افت ناگهانی (ناشی از رسوب‌گذاری) است.

اندازه‌گیری‌های مکرر در بازه‌های زمانی

اگر اندازه ذرات یا PDI در اندازه‌گیری‌های پیاپی افزایش یابد، نشان‌دهنده ناپایداری نمونه است.



شکل (۲): تفاوت نتایج در نمونه‌ای که فاقد سورفکتانت است (خط مشکی) و همان نمونه با سورفکتانت (خط قرمز).

تجمع ذرات منجر به افزایش اندازه هیدرودینامیکی گزارش شده می‌شود. شاخص ضریب غیریکنواختی^{۱۱} بالاتر از ۰/۷ به‌طور معمول نشان‌دهنده ناهمگنی در اندازه ذرات است. در چنین حالتی تابع همبستگی غیرنرمال و دارای نویز بالا می‌شود.

برای درک بهتر این مشکل، مثال عملی را بررسی کنیم. نانوذرات نقره با قطر اولیه ۲۰ نانومتر در آب دیونیزه (بدون پایدارکننده) در معرض تجمع قرار می‌گیرند. اگر اندازه‌گیری DLS بلافاصله پس از آماده‌سازی انجام شود، قطر ذرات ۲۰ نانومتر گزارش می‌شود، اما پس از ۳۰ دقیقه، اندازه ذرات به ۱۰۰ نانومتر افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تجمع ذرات به مرور زمان است.

رسوب‌گذاری

علت رسوب‌گذاری ذرات بزرگ (به‌طور معمول بالای ۱ میکرومتر) نمونه‌های با چگالی بالا هستند که در اثر نیروی گرانش ته‌نشین می‌شوند. این پدیده باعث کاهش غلظت ذرات در ناحیه پرتو لیزر و ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌شود. در چنین شرایطی دستگاه ممکن است اندازه ذرات باقیمانده در محلول را کوچکتر از حد واقعی گزارش کند. در چنین حالتی شدت پراکندگی به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد.

برای درک بهتر این موضوع به این مثال توجه کنید؛ ذرات میکرونی سیلیکا با قطر واقعی ۲ میکرومتر در آب دیونیزه معلق هستند. پس از ۱۰ دقیقه، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد و دستگاه DLS تنها ذرات کوچکتر از ۲۰۰ نانومتر (ناشی از ناخالصی‌ها) را تشخیص می‌دهد.

تجزیه شیمیایی

تجزیه به عوامل مختلفی می‌تواند مرتبط باشد. قرارگیری نمونه در معرض نور، اکسیژن و یا دمای نامناسب ممکن است باعث تخریب شیمیایی ذرات شود. برای مثال، نانوذرات آهن در محیط آبی اکسید شده و به ذرات اکسید آهن با اندازه متفاوت تبدیل می‌شوند. چنین وضعیتی تأثیرات مختلفی بر نتایج DLS می‌گذارد. ظهور قله‌های جدید در توزیع اندازه ذرات و افزایش PDI و کاهش تکرارپذیری داده‌ها از جمله این مشکلات هستند.

■ مقایسه با روش‌های مکمل

استفاده از روش‌هایی مانند TEM یا SEM برای تأیید اندازه ذرات و مشاهده مستقیم تجمع می‌تواند مفید باشد.

■ راهکارهای عملی برای بهبود پایداری نمونه

■ افزودن پایدارکننده‌ها

سورفکتانت‌ها: مانند سدیم دودسیل سولفات^{۱۲} یا سیترات سدیم برای ایجاد دافعه الکترواستاتیک استفاده می‌شوند. پلیمرها: مانند پلی اتیلن گلیکول^{۱۳} برای ایجاد دافعه فضایی به کار گرفته می‌شوند.

■ کنترل شرایط محیطی

pH: تنظیم pH به گونه‌ای که بار سطحی ذرات را افزایش دهد (به‌عنوان مثال، pH بالاتر از نقطه ایزوالکتریک). قدرت یونی: کاهش غلظت نمک در نمونه برای جلوگیری از فشردگی لایه دوگانه الکتریکی.

■ بهینه‌سازی فرآیند آماده‌سازی

■ اعمال امواج فراصوت: استفاده از حمام فراصوت برای جداسازی تجمعات قبل از اندازه‌گیری به بهینه‌سازی فرآیند آماده‌سازی نمونه کمک می‌کند.

■ ذخیره‌سازی نمونه: نگهداری نمونه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و دور از نور مستقیم نیز برای بسیاری از نمونه‌ها توصیه می‌شود. بدیهی است که نمونه‌های حساس به دمای پایین از این قاعده مستثنا هستند.

برای جمع‌بندی این بخش می‌توان گفت که پایداری نمونه پیش‌نیاز اصلی برای اندازه‌گیری دقیق DLS است. تجمع، رسوب‌گذاری و یا تجزیه شیمیایی ذرات می‌تواند نتایج را به‌طور کامل مخدوش کند. به‌منظور جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی رعایت نکات ذیل ضروری است:

■ از پایدارکننده‌های شیمیایی (سورفکتانت‌ها یا پلیمرها) استفاده شود.

■ شرایط محیطی (pH، دما، قدرت یونی) به دقت کنترل شود.

■ اندازه‌گیری‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن پس از آماده‌سازی نمونه انجام شود.

با رعایت این موارد، می‌توان از خطاهای ناشی از ناپایداری نمونه جلوگیری و داده‌های معتبری برای تحلیل نانوذرات به‌دست آورد.

■ خلوص نمونه

وجود ناخالصی‌ها (مانند ذرات گردوغبار یا حباب هوا) باعث ایجاد قله‌های کاذب در توزیع اندازه ذرات می‌شود. خلوص نمونه در آزمون DLS نقش اساسی در دقت و صحت اندازه‌گیری دارد.

آلودگی‌های شیمیایی ممکن است بر ویسکوزیته و ضریب شکست محلول تأثیر گذاشته و نتایج را دچار خطا کند. برای جلوگیری از این مشکلات، نمونه باید قبل از اندازه‌گیری فیلتر شده و از حلال‌های خالص و سازگار با ذرات مورد مطالعه استفاده شود. روش‌هایی مانند سانتریفیوژ یا فیلتراسیون با فیلترهای ۰/۲۲ میکرونی می‌تواند به بهبود خلوص نمونه کمک کند.

به‌عنوان مثال، نانوذرات لیپوزومی با قطر واقعی ۸۰ نانومتر در یک محلول آبی پراکنده شده‌اند. اگر نمونه دارای حباب‌های هوا یا ذرات گردوغبار باشد، DLS ممکن است قله‌هایی در اندازه‌های ۲۰۰ یا ۳۰۰ نانومتر نشان دهد که مربوط به این ناخالصی‌ها است. این امر می‌تواند منجر به تفسیر نادرست توزیع اندازه و اشتباه در تحلیل پایداری نمونه شود. برای رفع این مشکل، نمونه می‌تواند قبل از اندازه‌گیری به آرامی سانتریفیوژ شده و از طریق فیلتراسیون مناسب، ناخالصی‌ها حذف شوند.

■ ویسکوزیته حلال

ویسکوزیته مایع در آزمون DLS یکی از عوامل کلیدی است که به‌طور مستقیم بر محاسبه اندازه هیدرودینامیکی ذرات تأثیر می‌گذارد. دستگاه DLS اندازه ذرات را براساس حرکت براونی آن‌ها و ضریب انتشار محاسبه می‌کند. این ضریب از طریق معادله استوکس-اینشتین^{۱۴} به‌دست می‌آید که در آن ویسکوزیته سیال نقش اساسی دارد. اگر مقدار ویسکوزیته به اشتباه وارد شود، اندازه گزارش شده ذرات نادرست خواهد بود. در محیط‌های با ویسکوزیته بالا، حرکت براونی ذرات کاهش می‌یابد که منجر به کاهش ضریب انتشار و در نتیجه، گزارش اندازه بزرگ‌تر از مقدار واقعی می‌شود. برعکس، اگر ویسکوزیته پایین‌تر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود، ضریب انتشار بیش از مقدار واقعی محاسبه شده و اندازه ذرات کمتر از مقدار صحیح گزارش می‌شود. بنابراین، دقت در اندازه‌گیری و استفاده از مقدار صحیح ویسکوزیته، به‌ویژه در محلول‌های غلیظ، ضروری است.

به‌عنوان مثال، نانوذرات پلی‌استایرن با قطر واقعی ۱۵۰ نانومتر را در نظر بگیرید که در دو محیط مختلف اندازه‌گیری می‌شوند: آب (با ویسکوزیته ۰/۸۹ mPa.s) و محلول گلیسرول ۵۰ درصد (با ویسکوزیته ۵/۵ mPa.s). اگر هنگام اندازه‌گیری در محلول گلیسرول، ویسکوزیته آن به اشتباه مقدار آب در نظر گرفته شود، دستگاه اندازه نانوذرات را کمتر از مقدار واقعی گزارش خواهد کرد. این خطا می‌تواند باعث تفسیر اشتباه در تحلیل رفتار ذرات، پایداری و میزان پراکندگی آن‌ها شود. برای جلوگیری از این مشکل، ضروری است که مقدار ویسکوزیته دقیق سیال در هر آزمایش به‌درستی وارد شود.

■ دمای نمونه

دمای آزمون DLS یکی از عوامل کلیدی در دقت اندازه‌گیری

اندازه واقعی ۱۰۲ نانومتر به دست می‌آید که دقیق‌تر است. حال اگر نمونه شامل نانوذرات بزرگ‌تر (به‌عنوان مثال، ۵۰۰ نانومتر) باشد، در زاویه ۹۰ درجه، پراکندگی چندگانه باعث می‌شود دستگاه اندازه‌های کوچک‌تر از مقدار واقعی (به‌عنوان مثال، ۴۵۰ نانومتر) گزارش کند. اما در زاویه ۱۷۳ درجه، اثرات پراکندگی چندگانه کاهش یافته و اندازه واقعی‌تر (۴۹۵ نانومتر) به دست می‌آید. بنابراین، انتخاب زاویه پراش مناسب تأثیر زیادی بر صحت اندازه‌گیری دارد.

زمان اندازه‌گیری

زمان اندازه‌گیری^{۱۶} در آزمون DLS تأثیر مستقیمی بر کیفیت و دقت داده‌ها دارد. دستگاه DLS برای تحلیل اندازه ذرات، تابع همبستگی را براساس تغییرات شدت نور پراکنده شده در طول زمان ثبت می‌کند. اگر زمان اندازه‌گیری خیلی کوتاه باشد، داده‌های ثبت شده کافی نخواهند بود و نیز در تابع همبستگی افزایش می‌یابد که منجر به نتایج نادرست یا ناپایدار می‌شود. برعکس، اگر زمان اندازه‌گیری خیلی طولانی باشد، ممکن است اثرات محیطی (مانند تغییر دما یا تجمع ذرات) باعث ایجاد انحراف در نتایج شود.

به‌طور معمول زمان بهینه برای اندازه‌گیری بسته به غلظت نمونه و اندازه ذرات بین ۳۰ تا ۱۸۰ ثانیه است. برای نمونه‌های رقیق، افزایش زمان اندازه‌گیری می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را بهبود دهد، در حالی که برای نمونه‌های غلیظ، زمان کوتاه‌تر می‌تواند از تأثیر تجمع ذرات جلوگیری کند. فرض کنید نانوذرات پلی‌استایرن با قطر واقعی ۱۵۰ نانومتر در دو زمان مختلف اندازه‌گیری شوند:

■ در زمان اندازه‌گیری ۳۰ ثانیه، اندازه گزارش شده ۱۴۸ نانومتر است، اما تابع همبستگی دارای نویز زیادی است که می‌تواند منجر به عدم اطمینان در داده‌ها شود.

■ در زمان اندازه‌گیری ۹۰ ثانیه، اندازه ۱۵۱ نانومتر به دست می‌آید و تابع همبستگی صاف و پایدار است که نشان‌دهنده دقت بالاتر داده‌ها است.

■ اما در زمان اندازه‌گیری ۳۰۰ ثانیه، به دلیل تأثیرات محیطی و احتمال تجمع ذرات، دستگاه اندازه‌های بزرگ‌تر (به‌عنوان مثال، ۱۶۰ نانومتر) را گزارش می‌کند که نشان‌دهنده تغییرات در نمونه است.

بنابراین، تنظیم زمان اندازه‌گیری متناسب با نوع نمونه و شرایط آزمایش، برای دستیابی به نتایج دقیق و پایدار ضروری است.

کالیبراسیون دستگاه

کالیبراسیون نادرست یا وجود مشکل در تنظیمات دستگاه، نتایج را غیرقابل اعتماد می‌کند. توصیه می‌شود با استانداردهای مرجع (مانند نانوذرات سیلیکا یا پلی‌استایرن) دقت و صحت عملکرد دستگاه کنترل شود.

اندازه ذرات است، زیرا به‌طور مستقیم بر حرکت براونی ذرات، ویسکوزیته محیط و در نتیجه ضریب انتشار تأثیر می‌گذارد. افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته و افزایش تحرک ذرات می‌شود که منجر به محاسبه ضریب انتشار بیشتر و در نتیجه گزارش اندازه ذرات کوچک‌تر از مقدار واقعی می‌شود. برعکس، کاهش دما باعث افزایش ویسکوزیته، کاهش حرکت ذرات و در نتیجه گزارش اندازه‌های بزرگ‌تر از مقدار واقعی خواهد شد. علاوه‌بر این، دما می‌تواند بر پایداری نانوذرات تأثیرگذار باشد. برخی نانوذرات مانند پروتئین‌ها و لیپوزوم‌ها در دماهای بالا دچار تغییر ساختاری یا تجمع می‌شوند که باعث ایجاد قله‌های کاذب در توزیع اندازه می‌شود. بنابراین، کنترل دقیق دما در طول آزمون برای دستیابی به نتایج دقیق ضروری است. فرض کنید نانوذرات لیپیدی با قطر واقعی ۱۰۰ نانومتر در دو دمای مختلف اندازه‌گیری شوند: ۲۵ و ۴۰ سانتی‌گراد. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، اندازه گزارش شده ۱۰۲ نانومتر است که به مقدار واقعی نزدیک است. اما در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل کاهش ویسکوزیته و افزایش حرکت ذرات، اندازه گزارش شده به ۹۰ نانومتر کاهش می‌یابد. اگر نمونه شامل پروتئین باشد، ممکن است در دمای بالا تجمع ایجاد شود و دستگاه DLS اندازه‌هایی در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر گزارش کند که نشان‌دهنده تخریب و ناپایداری نمونه است.

زاویه پراش

انتخاب زاویه تشخیص (به‌طور معمول ۹۰ درجه یا ۱۷۳ درجه) بر شدت نور پراکنده شده و حساسیت اندازه‌گیری تأثیرگذار است. در دستگاه DLS، نور لیزر پس از برخورد با ذرات معلق در محیط، پراکنده می‌شود و آشکارساز این نور پراکنده شده را در زوایای مختلف ثبت می‌کند. زاویه اندازه‌گیری به‌طور معمول بین ۹۰ درجه (زاویه جانبی) و ۱۷۳ درجه (زاویه عقب‌گرد^{۱۵}) انتخاب می‌شود. انتخاب زاویه مناسب تأثیر مستقیمی بر حساسیت و دقت اندازه‌گیری دارد. زاویه‌های بزرگ‌تر (۱۷۳ درجه و بالاتر) به‌طور معمول برای نمونه‌های غلیظ و دارای ذرات بزرگ‌تر مناسب هستند. این زاویه‌ها به کاهش تأثیر پراکندگی چندگانه کمک کرده و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهند.

زاویه‌های کوچک‌تر (۹۰ درجه یا کمتر) برای نمونه‌های رقیق یا دارای ذرات کوچک‌تر استفاده می‌شوند، زیرا در این زاویه‌ها، سیگنال قوی‌تر و پایدارتر است. اگر زاویه به درستی انتخاب نشود، ممکن است اندازه ذرات بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از مقدار واقعی گزارش شود و یا حتی قله‌های کاذب در توزیع اندازه ظاهر شوند. فرض کنید نانوذرات سیلیکا با قطر واقعی ۱۰۰ نانومتر در دو زاویه مختلف اندازه‌گیری شوند:

■ در زاویه ۹۰ درجه، اندازه گزارش شده ۹۸ نانومتر است که مقدار دقیقی محسوب می‌شود.

■ در زاویه ۱۷۳ درجه، به دلیل کاهش تأثیر پراکندگی چندگانه،

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نتایج DLS، غلظت نمونه است. غلظت‌های بسیار بالا باعث پراکندگی چندگانه می‌شوند که موجب انحراف در نتایج و گزارش اندازه‌های بزرگ‌تر از مقدار واقعی خواهد شد. از سوی دیگر، غلظت‌های بسیار پایین ممکن است منجر به نسبت سیگنال به نویز پایین و ایجاد قله‌های کاذب در توزیع اندازه ذرات شوند. بنابراین، تنظیم مناسب غلظت نمونه در محدوده ایده‌آل، به‌طور معمول بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر، امری ضروری است.

علاوه‌بر غلظت، پایداری نمونه نیز در دقت نتایج تأثیر زیادی دارد. تجمع ذرات، رسوب‌گذاری و تجزیه شیمیایی می‌توانند نتایج آزمون را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. برای جلوگیری از این مشکلات، استفاده از پایدارکننده‌هایی مانند سورفکتانت‌ها و پلیمرهای پایدارکننده (مانند PEG) توصیه می‌شود. همچنین، کنترل pH و قدرت یونی محلول برای جلوگیری از تغییرات ساختاری در ذرات ضروری است. در نهایت، ذخیره‌سازی صحیح نمونه‌ها و انجام آزمایش در کوتاه‌ترین زمان پس از آماده‌سازی می‌تواند دقت نتایج را افزایش دهد.

تنظیمات زاویه پراش، زمان اندازه‌گیری و دمای آزمایش تأثیر مستقیمی بر نتایج آزمون DLS دارند. انتخاب زاویه مناسب برای اندازه‌گیری نور پراکنده شده از ذرات ضروری است.

زمان اندازه‌گیری نیز باید متناسب با شرایط نمونه تنظیم شود. زمان کوتاه ممکن است منجر به داده‌های نویزی شود، در حالی که زمان بیش از حد طولانی می‌تواند به دلیل تغییرات نمونه، نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور معمول ۳۰ تا ۱۸۰ ثانیه محدوده مناسبی برای اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود.

همچنین، دمای آزمایش باید به دقت کنترل شود. افزایش دما منجر به کاهش ویسکوزیته و افزایش حرکت ذرات می‌شود که می‌تواند باعث گزارش اندازه‌های کوچک‌تر از مقدار واقعی شود. برعکس، دمای پایین‌تر باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش حرکت ذرات خواهد شد که ممکن است اندازه‌های بزرگ‌تری نسبت به مقدار واقعی گزارش شود. بنابراین، انجام آزمایش در دمای کنترل‌شده (به‌طور معمول، ۲۵ درجه سانتی‌گراد) باعث افزایش دقت داده‌ها می‌شود.

کالیبراسیون دقیق دستگاه DLS یکی از مراحل ضروری برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها است. عدم کالیبراسیون یا استفاده از عوامل نادرست می‌تواند داده‌های غیرقابل اعتماد تولید کند. علاوه‌بر این، استفاده از روش‌های مکمل مانند میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تأیید نتایج آزمون‌های DLS پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

1. Dynamic light scattering (DLS)
2. Transmission electron microscopy (TEM)
3. Scanning electron microscopy (SEM)
4. Multiple Scattering
5. Correlation Function
6. Diffusion Coefficient
7. Signal-to-Noise Ratio
8. Count Rate
9. Aggregation
10. Sedimentation
11. polydispersity index (PDI)
12. Sodium dodecyl sulfate (SDS)
13. Polyethylene glycol (PEG)
14. Stokes-Einstein
15. Backscatter
16. Measurement Time



Author

Davoud Gharailoui^{1*}* Davoud.Gharailou@gmail.com

1. Technical Director of the DLS Laboratory, Sharif University of Technology Laboratory Services Center

Investigation of Key Factors Affecting DLS Results and Error Reduction Strategies

Abstract

Dynamic Light Scattering (DLS) is a widely used technique for measuring particle size and distribution in the nanometer scale. The accuracy of this method depends significantly on proper sample preparation and precise instrument settings. Sample concentration plays a crucial role in measurement accuracy. High concentrations can lead to multiple scattering, resulting in an overestimation of particle size, while low concentrations reduce signal strength and increase noise. Therefore, optimizing the concentration within the ideal range (0.1 to 1 mg/mL) is essential for reliable results. Sample stability is another critical factor. Particle aggregation, sedimentation, and chemical degradation can distort measurements. To mitigate these issues, the use of chemical stabilizers, pH adjustment, and conducting tests promptly after sample preparation is recommended. Instrument parameters also require careful calibration. Scattering angle, measurement duration, and temperature control are key factors influencing results. A 173-degree angle is preferable for concentrated samples, while a 90-degree angle is more suitable for dilute samples. Additionally, selecting an appropriate measurement duration (30 to 180 seconds) and maintaining temperature control are essential to prevent unwanted variations in particle size measurements.

Keywords

DLS, Dynamic Light Scattering, sample preparation, technical issues, particle size measurements.

Authors

Shokoufeh Habibi Manesh¹,
Mohammad Shafiei^{2*}

*Sh.habibi2520@gmail.com

1. Technical Expert genetics Central Laboratory, Shahid Chamran University of Ahvaz
2. Director Central Laboratory, Shahid Chamran University of Ahvaz



Droplet Polymerase Chain Reaction; A New Step in Molecular Diagnosis

Abstract

Since its introduction in the 1980s, the polymerase chain reaction (PCR) has revolutionized molecular biology, genetics, and medical research. However, traditional PCR faces limitations, including issues with accuracy, low sensitivity to rare mutations, and susceptibility to inhibitors. Droplet digital polymerase chain reaction (dPCR) addresses these challenges by partitioning DNA samples into thousands or millions of individual compartments, enabling precise quantification of DNA or RNA molecules without the need for calibration curves or internal controls. This paper explores the advantages of dPCR over traditional PCR, including higher accuracy in molecular quantification, increased sensitivity, reduced impact of inhibitors, and the ability to measure absolute quantities. The unique ability of dPCR to detect rare genetic mutations, analyze complex genetic variations, and perform environmental and forensic analyses makes it a valuable tool. Despite its advantages, dPCR faces challenges such as high costs, longer processing times, and the need for precise sample preparation. Overall, dPCR represents a significant advancement in molecular biology and is expected to become more widely utilized in biology and medical laboratories with technological improvements and cost reductions.

Keywords

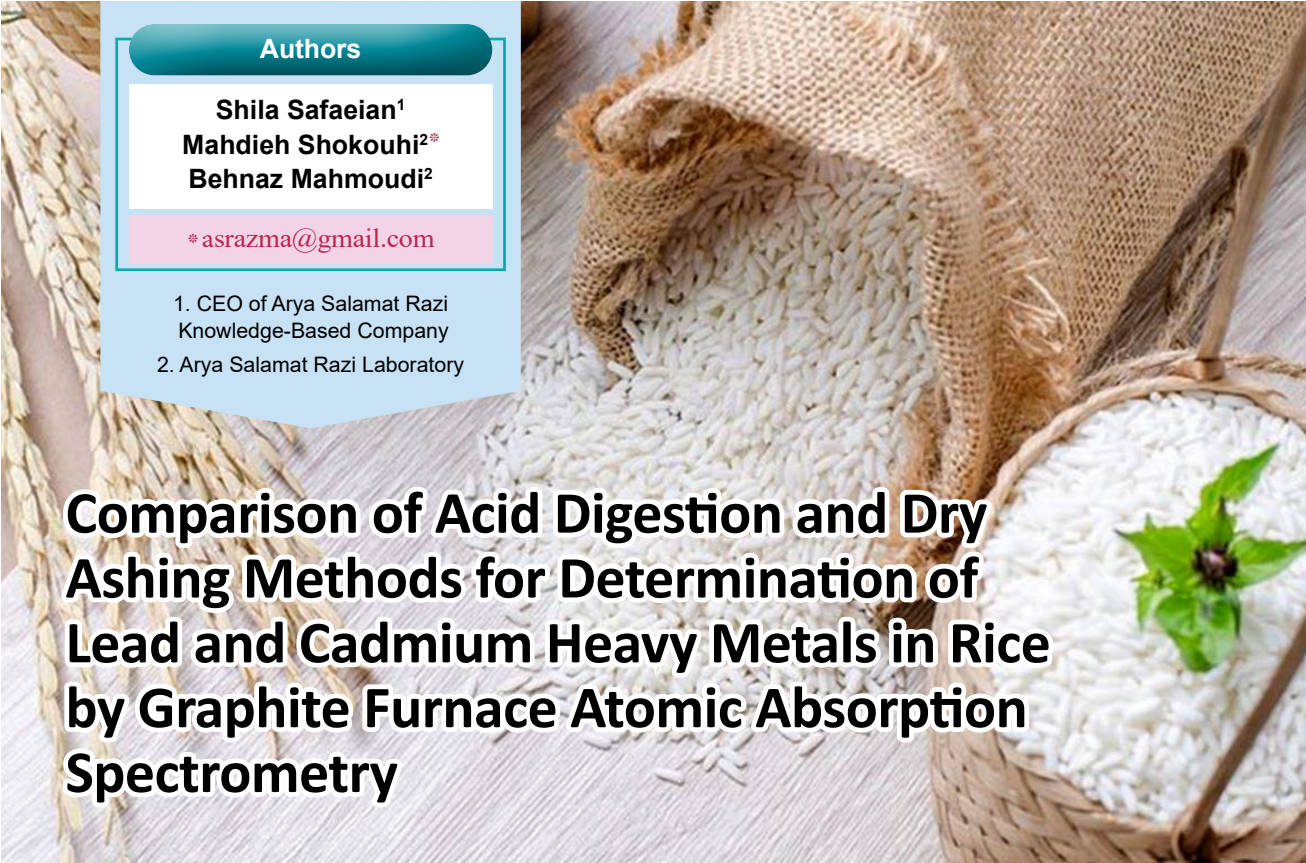
Droplet digital polymerase chain reaction, polymerase chain reaction, molecular biology, genetics, DNA

Authors

Shila Safaeian¹
Mahdiah Shokouhi^{2*}
Behnaz Mahmoudi²

*asrazma@gmail.com

1. CEO of Arya Sehat Razi Knowledge-Based Company
2. Arya Sehat Razi Laboratory



Comparison of Acid Digestion and Dry Ashing Methods for Determination of Lead and Cadmium Heavy Metals in Rice by Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry

Abstract

Heavy metals are considered persistent pollutants, and their entry into the food chain through food products can cause serious harm to the health of consumers. One of the common methods for determining the level of heavy metals is the use of graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS), and sample preparation is an important and critical step in spectroscopic analysis to achieve reliable and accurate results. Since the digestion method in the preparation stage depends on the sample matrix, and in the codified methods for each of the matrices, a separate and special standard method has not been mentioned, the purpose of this study is to compare the two methods of acid digestion and dry ashing in the study of heavy metals in rice products using the graphite furnace atomic absorption spectrometry method. Other objectives of this article include determining the levels of lead and cadmium pollutants in rice.

The results of comparing the two methods of acid digestion and dry ashing by (GFAAS) in rice samples show that the average concentration of lead and cadmium heavy metals in the acid digestion method is higher than the dry ashing method.

In general, the recovery percentage of lead and cadmium determination by the acid method is 103 and 99.7%, respectively, and the recovery of the dry digestion method is 110 and 99.5%, but the results of the t-test between the two dry digestion and acid digestion methods do not show a significant difference.

The analyzes performed on 45 samples of rice varieties that were randomly sampled from the market in 2022 show that the average concentration of lead and cadmium metals, respectively, in 91.1 and 97.8% of rice varieties is in the permissible range of 150 ppb and 60 ppb. Also, 8.9 and 2.2% of rice varieties, respectively, have lead and cadmium levels higher than the permissible limit mentioned in the national standard, and it is concluded that due to the nature of rice, the acid digestion method is better than the furnace method.

Keywords

graphite furnace atomic absorption, digestion, brass, lead, arsenic and cadmium.



Authors

Farideh Bataghva^{1,2*}
Hamid Heydari^{1,2}

* exirtajhizazma@gmail.com

1. Exir Tajhiz Azma research laboratory expert
2. Member of specialized working group of chromatography

(Part 1)

Sample preparation on filtration in chromatography

Abstract

Sample preparation for chromatography is a multi-step process that requires precision and the use of appropriate equipment. Using quality and appropriate filters for each sample and column and carefully adjusting the preparation steps can have a significant impact on the accuracy and precision of the results. Sample preparation for chromatography devices is a complex and precise process that includes various steps from sample extraction to sample injection into the device. In this article, we will discuss the importance of using a filter before sample injection into the device and before the solvent passes as the mobile phase, and their different types and applications of each separately.

Keywords

filter, membrane filter, chromatography, sample preparation, syringe filter.

Authors

Sajad Ramezani Jolfaei^{1*}Hossein Mohammadi²Maziar Nader Asli³[*Sajadr.j1993@yahoo.com](mailto:Sajadr.j1993@yahoo.com)

1. R&D Specialist at Azmouneh Foulad Co
2. Head of the R&D at Azmouneh Foulad Co
3. Technical Inspection Manager at Azmouneh Foulad Co

Radiographic Film Interpretation Using Artificial Intelligence and Image Processing Techniques



Abstract

Today, artificial intelligence and image processing are widely used for the precise analysis of radiographic images of industrial welds in non-destructive testing (NDT). These systems enhance image quality and reduce noise, enabling the automated detection and classification of welding defects. The utilization of deep learning minimizes reliance on human interpretation and limits external influencing factors. This technology empowers welding inspectors and engineers across various industries, such as oil, gas, and automotive, to analyze data swiftly and accurately, significantly improving the efficiency and safety of industrial processes.

Keywords

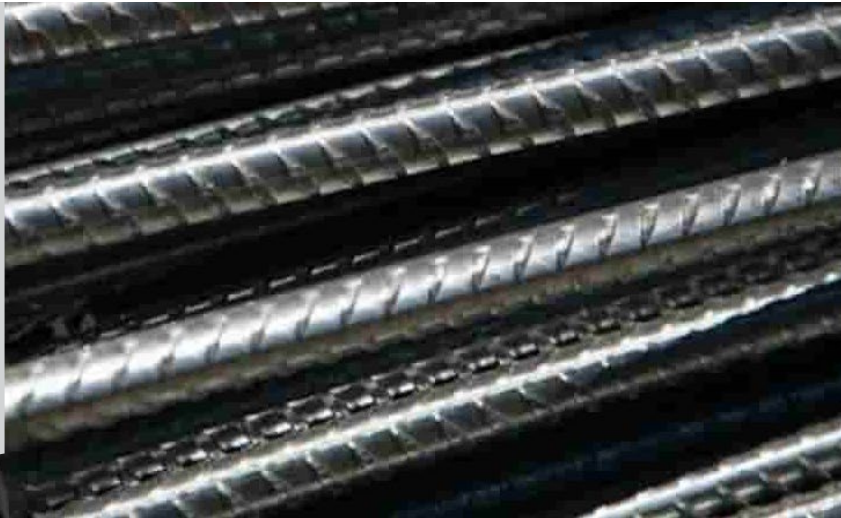
Artificial intelligence, image processing, industrial radiography, non-destructive testing.

Authors

Kivan Ebn-Ali Heidari^{1*}Behnam Ebrah²[*k1.ebh95@gmail.com](mailto:k1.ebh95@gmail.com)

1. Geotechnical Engineer,
Azmouneh Foulad Consulting
Engineers Company

2. Geotechnical Engineering
and In-Situ Testing Manager,
Azmouneh Foulad Consulting
Engineers Company



Investigation of the Effect of Reinforcement Installation Conditions Using Chemical Adhesives in Concrete on Pull-Out Resistance

Abstract

The installation of reinforcement in concrete using chemical adhesives is one of the most effective methods for enhancing and strengthening concrete structures, particularly in retrofitting and infrastructure reinforcement projects. This study investigates the influence of adhesive type and environmental conditions on the tensile strength of embedded reinforcement in concrete. Two types of adhesives, epoxy and epoxy-acrylate, were selected as bonding agents, and tests were conducted under various conditions, including vertical and horizontal reinforcement installations in field (in-situ) settings. The primary objective of this research is to gain a deeper understanding of how these variables affect the ultimate tensile strength of embedded reinforcement and to propose optimization strategies for improving their performance.

The results indicated that epoxy adhesive, due to its higher resistance to moisture and tensile forces, demonstrated an average of 25% better performance compared to epoxy-acrylate adhesive. Epoxy adhesive exhibited superior bonding strength and stability in humid environments and under both dynamic and static loads. On the other hand, epoxy-acrylate adhesive, with its faster curing time and lower cost, proved to be a suitable option for projects requiring moderate strength and in dry environments. Additionally, the orientation of reinforcement installation significantly influenced the ultimate strength, with vertically installed reinforcement showing higher resistance compared to horizontally installed reinforcement.

This study also compared the experimental results with international standards ACI 355 and ASTM E488, confirming that the findings are consistent with these standards. Overall, the results emphasize that the selection of adhesive type and adherence to appropriate environmental conditions, particularly hole cleanliness and moisture control, are critical factors in enhancing the performance of embedded reinforcement in concrete. These findings can serve as a guide for engineers and structural specialists in selecting suitable adhesives and developing optimized installation guidelines for construction and retrofitting projects.

Keywords

Reinforcement installation, epoxy adhesive, tensile strength, installation conditions



Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Volume 12 ■ Issue 4 ■ Winter 2025 ■ No.48

ISSN 2538-3450

Concessionaire:

Iran Nanotechnology Innovation Council

Managing Editor: Alireza Badiei

Editor in Chief: Mojtaba Nasab

Executive Management: Iran Nanotechnology
Laboratory Network (INLN)

Article Editor: Davoud Gharailou

Authors:

Davoud Gharailou, Mohammad Shafiei
Shokoufeh Habibi Manesh, Mahdieh Shokouhi
Shila Safaeian, Behnaz Mahmoudi
Farideh Bataghva, Hamid Heydari
Sajad Ramezani Jolfaei, Hossein Mohammadi
Maziar Nader Asli, Kivan Ebn-Ali Heidari
Behnam Ebrah

Designer : Simin Rafipour Langroudi

Editor: Zeinab Zarincheh

Iran, Tehran, Po.Box: 14565-344

www.IJLK.ir

Email : info@ijlk.ir



Iran Nanotechnology
Laboratory Network

Contents



Investigation of Key Factors
Affecting DLS Results and Error
Reduction Strategies

>43



Droplet Polymerase Chain Reaction;
A New Step in Molecular Diagnosis

>44



Comparison of Acid Digestion and Dry Ash-
ing Methods for Determination of Lead and
Cadmium Heavy Metals in Rice by Graphite
Furnace Atomic Absorption Spectrometry

>45



Sample preparation on filtration in
chromatography (Part 1)

>46



Radiographic Film Interpretation
Using Artificial Intelligence and
Image Processing Techniques

>47



Investigation of the Effect of
Reinforcement Installation Conditions
Using Chemical Adhesives in Concrete
on Pull-Out Resistance

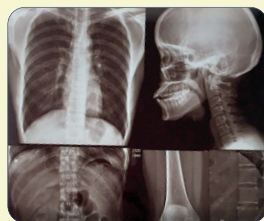
>48



Investigation of Key Factors Affecting DLS Results and Error Reduction Strategies



Investigation of the Effect of Reinforcement Installation Conditions Using Chemical Adhesives in Concrete on Pull-Out Resistance



Radiographic Film Interpretation Using Artificial Intelligence and Image Processing Techniques



Sample preparation on filtration in chromatography (Part 1)



Comparison of Acid Digestion and Dry Ashing Methods for Determination of Lead and Cadmium Heavy Metals in Rice by Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry



Droplet Polymerase Chain Reaction; A New Step in Molecular Diagnosis